Michał Kłodawski

Modelowanie procesów magazynowych w zastosowaniu do oceny wydajności i bezpieczeństwa pracy w magazynach

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Modelowanie procesów magazynowych w zastosowaniu do oceny wydajności i bezpieczeństwa pracy w magazynach

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Modelowanie procesów magazynowych w zastosowaniu do oceny wydajności i bezpieczeństwa pracy w magazynach

Michał Kłodawski

WARSZAWA 2018
OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Opiniodawcy
Ilona Jacyna-Gołda
Agnieszka Merkisz-Guranowska

Projekt okładki
Danuta Czudek-Puchalska
Fotografia na okładce pochodzi ze zbiorów autora

Skład komputerowy wykonała firma Stämpfli

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w Internecie bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISBN 978-83-7814-809-8

Księgarnia internetowa Oficyny Wydawniczej PW www.wydawnictwopw.pl
tel. 22 234-75-03; fax 22 234-70-60; e-mail: oficyna@pw.edu.pl

Oficyna Wydawnicza PW, ul. Polna 50, 00-644 Warszawa. Wydanie I. Zamówienie nr 306/2018
Druk i oprawa: Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej, tel. 22 234-70-30

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie 7
1.1. System a proces magazynowy 7
1.2. Zadania i cele procesu magazynowego 14
1.3. Cel i zakres monografii 15

2. Wybrane aspekty modelowania procesów magazynowych 20
2.1. Model i modelowanie 20
2.2. Typy modeli 24
2.3. Cele modelowania procesów magazynowych 30

3. Obiekty magazynowe i realizowane w nich procesy 34
3.1. Obiekty magazynowe i ich rodzaje 34
3.2. Podstawowe elementy procesu magazynowego 39
3.3. Charakterystyka elementów procesu magazynowego 40

4. Problematyka wydajności i bezpieczeństwa w obiektach magazynowych 46
4.1. Efektywność i wydajność procesu i obiektu magazynowego 46
4.2. Miary efektywności i wydajności procesu i obiektu magazynowego 48
4.3. Wybrane podejścia do zwiększania wydajności procesu magazynowego 52
4.3.1. Dobór technologii składowania i transportu wewnętrznego 52
4.3.2. Organizacja pracy obiektu magazynowego 61
4.4. Zagrożenia pracowników magazynowych 67
4.4.1. Procesy przyjęcia i wydania z magazynu 67
4.4.2. Procesy składowania i buforowania materiałów w obrębie magazynu 68
4.4.3. Proces kompletacji 69
4.4.4. Procesy przemieszczania z wykorzystaniem wózków magazynowych 72
4.5. Wybrane podejścia do ograniczania ryzyka i zagrożeń w procesach magazynowych . . . 79
4.6. Ocena ryzyka zawodowego w obiektach magazynowych 87
4.6.1. Ryzyko, zagrożenie i bezpieczeństwo 87
4.6.2. Miary ryzyka zawodowego 91
4.6.3. Algorytm analizy i oceny ryzyka zawodowego 95
4.6.4. Metody oceny ryzyka zawodowego 100

5. Model obiektu i procesu magazynowego 104
5.1. Uwagi ogólne 104
5.2. Struktura obiektu magazynowego 107

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

5.3. Zadania logistycznego obiektu magazynowego 115
5.4. Zasoby pracy obiektu magazynowego 121
5.4.1. Środki transportu wewnętrznego i maszyny 121
5.4.2. Pracownicy magazynowi 123
5.5. Charakterystyki elementów struktury magazynu 125
5.6. Organizacja procesu magazynowego 129
5.6.1. System informacyjny – przetwarzanie informacji i zadań 129
5.6.2. Czas obsługi zadań w procesie magazynowym 135
5.6.3. Zmienne decyzyjne i warunki brzegowe modelu MPM 139
5.6.4. Kryteria oceny procesu magazynowego 143

6. Wybrane modele procesów magazynowych dotyczące wydajności i bezpieczeństwa . . . 146
6.1. Uwagi ogólne 146
6.2. Model rozmieszczenia asortymentu w magazynie 148
6.3. Model optymalizacji tras pracowników 154
6.4. Model oceny bezpieczeństwa w obiektach magazynowych 158

7. Metody symulacyjne w ocenie procesów magazynowych 164
7.1. Wprowadzenie do metod symulacyjnych 164
7.1.1. Symulacja a model symulacyjny 164
7.1.2. Wady i zalety symulacji 165
7.2. Konstruowanie modeli symulacyjnych 167
7.3. Narzędzia do symulacji procesów magazynowych 170

8. Badania symulacyjne procesów magazynowych w aspekcie wydajności i bezpieczeństwa – *case study* 173
8.1. Założenia do badań symulacyjnych 173
8.2. Parametry podstawowych elementów modelu symulacyjnego 175
8.3. Logika działania modelu symulacyjnego 179
8.4. Warianty symulacyjne 181
8.4.1. Układ korytarzy roboczych i organizacja pracy 181
8.4.2. Prędkość poruszania się w układzie transportu wewnętrznego 185
8.5. Wyniki prowadzonych badań 186
8.5.1. Układ trójblokowy z analizą sytuacji kolizyjnych we wszystkich korytarzach . . . 186
8.5.2. Układ trójblokowy z analizą sytuacji kolizyjnych w korytarzach poprzecznych . . 191
8.5.3. Układ dwublokowy z analizą sytuacji kolizyjnych w korytarzach poprzecznych . . . 195
8.5.4. Prędkość poruszania się wózków magazynowych 197
8.6. Porównanie i podsumowanie uzyskanych wyników 199

9. Podsumowanie 207

Literatura 209

Spis ilustracji 223

Spis tabel 226

Załączniki 227

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

1 WPROWADZENIE

1.1. SYSTEM A PROCES MAGAZYNOWY

Wszystkie obiekty, które da się wyróżnić w otaczającym nas świecie, można scharakteryzować za pomocą określonych parametrów, właściwości i zestawu cech. Odwzorowują one pewien wyróżniony fragment rzeczywistości, który został zdefiniowany na potrzeby realizacji określonego celu. Współczesne badania naukowe bardzo często traktują i rozpatrują obiekty jako systemy [3], [9], [10], [21], [53], [78], [94], [123], [123], [148], [150], [151], [169], [194], [233], [267], [308].

System może być zatem traktowany jako obiekt, którego opis ma postać zbioru elementów (składników), powiązanych pomiędzy sobą i otoczeniem w sposób umożliwiający osiągnięcie określonego celu [169]. Często jest on także definiowany jako pewna funkcjonalna całość, zestawiona ze ściśle określonej liczby elementów pozostających ze sobą w ustalonych relacjach (powiązaniach), niezbędnych do tego, aby całość realizowała określone cele oraz pełniła przypisane jej funkcje. Niezbędna liczba elementów jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym, do zdefiniowania systemu. Konieczne jest również by owa funkcjonalna całość posiadała tyle relacji i powiązań, ile wymaganych jest do pełnienia przez nią określonych funkcji [123], [308].

Każdy system posiada pewne własności ogólne. Jako najważniejsze z nich można wymienić [123], [23], [94], [138], [194], [239], [271], [309], [299]:

- *kompleksowość systemu* – system stanowi pewną całość, mającą ściśle określone własności i sposób zachowania się;
- *dekomponowalność systemu* – możliwość podziału systemu na mniejsze, wzajemnie ze sobą powiązane części (elementy systemu lub podsystemy). Powstałe w ten sposób elementy mogą być rozpatrywane niezależnie, wówczas pozostałe części systemu są traktowane jako ich otoczenie. Dekompozycja systemu wiąże się także z możliwością działania odwrotnego, czyli agregacji elementów systemu bądź podsystemów w większą całość (system);
- *odosobnienie systemu* – możliwość wyizolowania systemu z otoczenia i rozpatrywania go jako tzw. system zamknięty. Własność ta wskazuje, iż nie istnieją

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

takie elementy systemu, które byłyby zarazem elementami jego otoczenia i odwrotnie. Odosobnienie nie oznacza jednak braku powiązań systemu z otoczeniem. Powiązania takie istnieją, np. wejście i wyjście z systemu. Ponadto, otoczenie może wprowadzić zakłócenia w funkcjonowaniu systemu, a ten z kolei oddziaływać na otoczenie;
- *identyfikowalność systemu* – możliwość wyodrębnienia z systemu każdego jego elementu, co oznacza, że elementy systemu mogą być rozróżniane, klasyfikowane itd.;
- *różnorodność w jedności systemu* – możliwość wyróżniania się przez każdy element systemu własnym sposobem zachowania się i własnym stanem w stosunku do innych elementów systemu. Różnorodność ta układa się w sposób zachowania i stan całego systemu;
- *odwzorowywalność systemu* – możliwość odwzorowania każdego obiektu w system a następnie w jego model. Odwzorowanie zazwyczaj stanowi uproszczenie obiektu rzeczywistego;
- *nieokreśloność systemu* – bardzo często nie ma możliwości odwzorowania wszystkich własności systemu i relacji między jego elementami. Nieokreśloność systemu warunkuje zasadność stosowania teorii probabilistycznych do opisu i badań systemów;
- *niezawodność systemu* – możliwość przewidzenia niezawodnego, pożądanego i uprzednio określonego zachowania systemu. Miarą niezawodności systemu jest prawdopodobieństwo tego, że w pewnym okresie czasu będzie on realizował swoje zadania w sposób prawidłowy i niezakłócony;
- *adaptacyjność systemu* – umiejętność dostosowania się systemu do zmian jego stanów i zmian stanów otoczenia, umożliwiając tym samym podtrzymanie dalszej realizacji funkcji systemu. System jest adaptacyjny wtedy i tylko wtedy, jeśli dzięki swemu zachowaniu może utrzymać w zakresie ustalonego przedziału pewne istotne zmienne, czyli takie, od których zależy poprawne działanie systemu;
- *współzależność systemu* – cecha zależna od liczby i znaczenia sprzężeń między elementami systemu, przejawiająca się tym, że istnieją elementy systemu, których zmiana stanu wywoła reakcję pozostałych elementów.

Dodatkowo ze względu na poprawność prowadzonych badań związanych z systemami należy pamiętać, iż [123]:
- każdy system powinien być określony w sposób umożliwiający dokładnie ustalenie, które elementy należą do niego, a które do jego otoczenia (*ścisłość systemu*);
- podczas badań sposób określenia systemu powinien pozostawać niezmienny, niedopuszczalne jest bowiem, aby pewne elementy były traktowane raz jako części systemu, a innym razem jako elementy otoczenia (*niezmienność systemu*);

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- system nie może zawierać elementów nienależących do żadnego z jego podsystemów, wobec czego podział systemu na podsystemy powinien być zupełny (*zupełność systemu*);
- system nie może zawierać elementów należących do kilku podsystemów równocześnie, wobec czego podział systemu na podsystemy powinien być rozłączny (*rozłączność systemu*).

Na potrzeby prowadzenia badań różnego rodzaju systemów niezbędne jest zidentyfikowanie ich struktury a także możliwości jej przekształcania (czyli znajomość możliwych sposobów zachowania się systemu). Zazwyczaj przyjmuje się, że system składa się z określonej liczby elementów i relacji. Każdy z elementów opisany jest zbiorem cech. Odpowiedni dobór zbioru cech mierzalnych dla każdego z elementów będzie w pełni charakteryzował system (obiekt) z punktu widzenia celu zaplanowanych badań.

Zakładając, że system to wyszczególnienie zbioru elementów oraz zbioru relacji określonych na jego elementach, jego strukturę można przedstawić w postaci uporządkowanej pary [122], [123], [239]:

$$\boldsymbol{S} = < \boldsymbol{A}, \boldsymbol{R} > \tag{1.1}$$

dla której:
$\boldsymbol{A}$ – zbiór wyróżnionych elementów w systemie, tj.:

$$\boldsymbol{A} = \{a_i : \quad i = 1, 2, ..., n\} \tag{1.2}$$

Przyjmując dodatkowo, że każdy element systemu charakteryzuje się określonymi, kwantyfikowalnymi cechami, wówczas element a_i opisany będzie wektorem cech o składowych w_i^k; $k = 1, ..., q_i$, tj.:

$$a_i \equiv < w_i^1, w_i^2, ..., w_i^k, ..., w_i^{q_i} > \tag{1.3}$$

przy czym w_i^k jest liczbą określająca wartość k-tej cechy i-tego elementu, natomiast q_i jest liczbą wyróżnionych cech i-tego elementu systemu.
$\boldsymbol{R}$ – zbiór relacji określonych na elementach systemu, jak również na niektórych elementach systemu i otoczenia.

$$\boldsymbol{R} = \{\boldsymbol{R}_j : \ j = 1, 2, ..., m\} \tag{1.4}$$

Każda relacja $\boldsymbol{R}_j$ jest podzbiorem iloczynu kartezjańskiego, wobec tego może być zapisana w postaci:

$$\boldsymbol{R_j} \subset \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{A} \quad \text{dla} \quad j = 1, 2, ..., m \tag{1.5}$$

przy czym $\boldsymbol{R}_j$ jest to relacja określona na zbiorze cech elementów zbioru $\boldsymbol{A}$. To wskazuje, że określone są powiązania między elementami zbioru $\boldsymbol{A}$ należącego

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

do systemu $\boldsymbol{S}$. Powiązania te warunkują możliwość poprawnego odwzorowania systemu, a tym samym realizacji celu badań.

Każdy system wypełnia określony cel i realizuje związane z nim zadania. W wyniku tego podlega ciągłym zmianom. Zmiany te zachodzą w czasie, przy czym w ich wyniku system zachowuje swoje podstawowe własności. Z określonym zachowaniem się systemu w czasie związane jest pojęcie dynamiki. Uwzględnienie dynamiki polega na tym, że na wielkości wyjściowe systemu w chwili bieżącej ma wpływ przebieg wielkości wejściowych w chwilach wcześniejszych [122], [123], [169].

Zachowanie się systemu jest związane ze zmianami jego stanów w czasie, które w rezultacie odwzorowują procesem jaki dany system realizuje (w ramach wypełnianych zadań, funkcji i celu). Wobec tego stanem systemu $\boldsymbol{S}$ w chwili t nazywany będzie stan wszystkich elementów systemu w chwili t. Natomiast zmiany stanów systemu $\boldsymbol{S}$ w czasie nazywane będą *procesem*, oznaczanym dalej przez $\boldsymbol{P}$ [124].

Uwzględniając powyższe, *procesem* nazywane będzie zjawisko, którego opis ma postać związków pomiędzy stanami systemu w czasie. Formalnie proces $\boldsymbol{P}$ można zapisać jako [124]:

$$\boldsymbol{P}\colon \boldsymbol{X} \times \boldsymbol{T} \rightarrow \boldsymbol{X} \times \boldsymbol{T'} \qquad (1.6)$$

$\boldsymbol{X}$ – zbiór, którego elementami są wszystkie cechy $x(a)$ *elementów* $a \in \boldsymbol{A}$,
$\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{T'}$ – zbiór chwil (momentów); zazwyczaj wymagane jest aby wartości $t \in \boldsymbol{T}$ były uporządkowane chronologicznie, tzn. tworzyły ciąg niemalejący.

Proces zapisany w powyższy sposób będzie nazywany procesem dyskretnym w czasie (numeracja wartości cech oraz numeracja chwil). W przypadku powiązania pojęcia systemu z pojęciem czasu należy rozpatrywać przestrzeń stanów systemu $\boldsymbol{X}$ w funkcji czasu, tzn. $\boldsymbol{X}(t)$.

Realizacją procesu $\boldsymbol{P}$ będzie nazywany ciąg kolejnych stanów systemu $\boldsymbol{X}(t)$ w określonym przedziale czasu, np. $t \in (t_p, t_k)$, gdzie t_p określa chwilę początkową, natomiast t_k chwilę końcową analizy danego procesu.

Stan systemu w chwili t_p będzie nazywany *stanem początkowym* procesu rozpatrywanego systemu, a w chwili t_k – *stanem końcowym* procesu tego systemu. Natomiast wyróżniony ciąg stanów, jakie przyjmuje system w analizowanym przedziale czasu (t_p,t_k) będzie nazywany *trajektorią procesu* [124], [169].

Niemniej jednak w literaturze odnaleźć można wiele różnych podejść do definiowania procesów. Definicje te mogą przyjmować różne formy w zależności od dziedziny wiedzy i nauki, w jakiej pojęcie to jest stosowane lub branży czy też grupy zawodowej, przez jaką jest ono wykorzystywane. Inne rozumienie pojęcia proces będzie stosowane w technicznych publikacjach, inne w publikacjach medycznych czy biologicznych, a jeszcze inne w tekstach dotyczących psychologii czy też aktów prawnych. Najbardziej ogólna i uniwersalna (z punktu widzenia

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

możliwości zastosowania) jest definicja prezentowana w [274]. Proces jest tam opisywany jest jako przebieg następujących po sobie, powiązanych przyczynowo, określonych zmian stanowiących kolejne stadia, fazy, etapy rozwoju czegoś. Podobnie definiuje go T. H. Davenport w publikacji [52], określając proces jako specyficzne uporządkowanie działań ze względu na czas i miejsce, z wyróżnieniem początku i końca oraz jasno zidentyfikowanym wejściem i wyjściem, strukturą dla akcji. Bardziej techniczne podejście do definiowania procesu zaprezentowali autorzy publikacji [90], w której nazwali go ciągiem logicznie powiązanych działań mających na celu wytworzenie pewnego wyniku lub zmianę stanu pewnego obiektu ze stanu zastanego w pożądany stan końcowy. Jeszcze inne spojrzenie na proces przedstawił Blaik w publikacji [27]. Na potrzeby prezentacji w niej różnych koncepcji zarządzania logistycznego zdefiniował proces jako zintegrowany, celowy układ bądź łańcuch czynności, powtarzający się i zdeterminowany przebieg działań, zorientowany na klientów, określony przez przepływy materiałów i informacji, przenikający granice poszczególnych sfer działalności przedsiębiorstwa, obejmujący pierwotne i wtórne aktywności tworzące wartość.

Jak wcześniej zauważono, każdy system może być traktowany jako obiekt, którego opis ma postać zbioru elementów (składników), powiązanych pomiędzy sobą i otoczeniem w sposób umożliwiający osiągnięcie określonego celu. Wobec tego obiekt *magazynowy* (magazyn) może być postrzegany jako *system magazynowy*, którego zasadniczym celem jest realizacja zadania logistycznego (patrz rozdział 1.2). System ten składa się z określonych elementów, takich jak np. wydzielona przestrzeń (infrastruktura, budynki, strefy funkcjonalne itp.), środki techniczne, zasoby ludzkie, informatyczne i finansowe, które są odpowiednio powiązane (zorganizowane) ze sobą oraz otoczeniem w sposób umożliwiający realizację określonych funkcji i zadań (rys. 1.1).

Rys. 1.1. System magazynowy i jego otoczenie
Źródło: opracowanie własne.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Uwzględniając powyższe, *system* (*obiekt*) *magazynowy* może zostać zdefiniowany jako punktowy element infrastruktury w sieci logistycznej (łańcuchu dostaw, systemie dystrybucji, zaopatrzenia itp.) dysponujący budowlami, urządzeniami, systemami transportu wewnętrznego oraz technologią i organizacją koniecznymi do wykonywania zadań dystrybucji lub zaopatrzenia, w tym: buforowania (składowania), rozdziału i agregacji, przekierowania oraz zmiany postaci fizycznej materiałów w sieci logistycznej [184].

W celu wypełnienia podstawowych zadań i funkcji związanych z przekształcaniem strumieni materiałów i informacji pojawiających się na wejściu w strumienie wyjściowe obiekty magazynowe realizują szereg procesów, zwanych *procesami magazynowymi*. W literaturze problemu są one różnie definiowane. Według publikacji [70] proces magazynowy (określany również jako magazynowanie) to zbiór czynności dokonywanych na materiałach i informacjach przy pomocy ludzi, oraz za pomocą urządzeń i środków transportowych, w całym obszarze magazynu, począwszy od: wyładunku środków transportu zewnętrznego, poprzez przyjęcie, składowanie, komisjonowanie, wydanie, aż do załadunku środków transportu zewnętrznego, sterowany i kontrolowany przez specjalistyczne narzędzia informacyjne i informatyczne. Bardzo podobnie do pojęcia magazynowania odnosi się polska norma PN-84/N-01800, według której jest to zespół czynności następujących po sobie w określonej kolejności, składających się z przyjęcia, buforowania, składowania, przechowywania, komisjonowania, przemieszczania, konserwacji i wydawania. Dodatkowo wszystkie one podlegają ewidencjonowaniu i kontroli. Szersze spojrzenie na proces magazynowy zaprezentowano w pracy [184], gdzie definiowany jest on jako część składowa innego procesu, a dokładnie procesu logistycznego (realizowanego w systemie logistycznym), mającego na celu dostarczenie odbiorcom dóbr zgodnie z zasadą 7R, obejmująca czynności wykonywane w przestrzeni magazynu, tj. przeładunki, manipulacje, przetwarzanie i przechowywanie materiałów, a także aktualizację informacji biznesowych i technicznych na ich temat.

Zakładając, że obiekt magazynowy może być traktowany jako układ składający się z elementów biorących udział w procesie przemieszczania jednostek ładunkowych, wówczas proces magazynowy może być opisywany jako szereg związków między stanami elementów systemu magazynowego (zasobów technicznych i ludzkich, jednostek materiału), zapisanych w postaci określonych odwzorowań matematycznych i logicznych. Można zatem przyjąć, że stany elementów obiektu magazynowego wyznaczają jednoznacznie stany magazynu. W procesie magazynowym każdy kolejny stan systemu magazynowego wywołany jest przez jego stan poprzedni lub przez interakcję z otoczeniem. Składowymi stanu obiektu magazynowego są stany poszczególnych elementów funkcjonalnych magazynu biorących udział w realizowanych procesach. Takie podejście wskazuje, iż stan obiektu magazynowego można definiować jako najmniejszą liczbę danych, wartości wyróżnionych cech danego magazynu,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

których znajomość w wyróżnionej chwili pozwala jednoznacznie określić wielkości wyjściowe obiektu magazynowego. W ten sposób proces magazynowy, w odróżnieniu od wcześniej przytoczonych definicji uwzględniających aspekty technologiczne, można zdefiniować jako ciąg kolejnych zmian stanów obiektu magazynowego występujących między jego stanem początkowym a stanem końcowym [145].

Przebieg procesu magazynowego stanowi odwzorowanie działań powodujących transformację strumieni wejściowych w wyjściowe. Tym samym w procesie magazynowym można wyróżnić trzy podstawowe typy przekształceń (transformacji) [184], tj.:

- *zmiana postaci materiałów* – transformacja ze względu na postać w aspekcie produkcyjno-wytwórczym dotyczy zmiany postaci fizycznej materiałów w procesie produkcyjnym lub procesie przetwarzania (różnicowania wyrobu gotowego), natomiast na płaszczyźnie dystrybucyjno-handlowej związana jest ze zmianą postaci ładunkowej (transportowej) lub handlowej w wyniku: komisjonowania, pakowania, konfekcjonowania lub montażu. Zmiana postaci materiałów wymaga odpowiedniej przestrzeni, zasobów oraz czasu;
- *zmiana położenia w przestrzeni* – transformacja ze względu na położenie w przestrzeni wymaga zaangażowania odpowiednich zasobów pracy – środków transportu i ludzi (gwarantujących ich racjonalne wykorzystanie ze względu na koszt i czas przemieszczania);
- *przekształcanie ze względu na czas* – transformacja strumieni materiałów (oraz informacji) służąca podtrzymaniu ciągłości działania układów dystrybucyjnych i produkcyjnych (w skład których wchodzą obiekty magazynowe) lub utrzymaniu określonych rezerw materiałowych. Podstawowy element procesu magazynowego związany z tą transformacją to składowanie.

Rozważając proces magazynowy jako ciąg przekształceń i transformacji wykonywanych na obsługiwanych materiałach i informacjach może być on definiowany jako sekwencja działań – przekształceń – dokonywanych na strumieniach materiałów i związanych z nimi informacji przez zasoby robocze: urządzenia i pracowników w przestrzeni magazynu mających na celu przeprowadzenie ich od wejścia do magazynu (dostawa) aż do wyjścia (wysyłka), zgodnie z zapotrzebowaniem klientów, przy najniższych kosztach (efektywnie) i niezawodnie (odpowiednio jakościowo) [184].

Realizacja transformacji materiałów i informacji w ramach procesu magazynowego wymaga podejmowania wielu decyzji sterujących na różnych jego etapach. Dąży się przy tym do tego, aby sterowanie przebiegiem poszczególnych transformacji przyczyniało się stale do poprawy wydajności i bezpieczeństwa procesu magazynowego, a tym samym zwiększenia wydajności i bezpieczeństwa pracy całego obiektu magazynowego.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

1.2. ZADANIA I CELE PROCESU MAGAZYNOWEGO

Do podstawowych celów procesu magazynowego należy realizacja zadań stawianych przed obiektem magazynowym (zadań logistycznych), w którym tenże proces zachodzi. Wobec tego w zależności od rodzaju obiektu, jego otoczenia i przydzielonych mu funkcji możliwe są różne rodzaje zadań i celów jakie powinien wypełniać proces magazynowy.

Podstawowe cechy obiektów magazynowych, wynikające z ich roli i pełnionych funkcji w sieci transportowo-logistycznej to (por. [19], [48], [60], [115], [184]):
- zdolność przechowywania materiałów (buforowania strumieni materiałów) określona przez pojemność magazynu,
- zdolność konsolidowania strumieni materiałów w sensie kierunku i czasu,
- zdolność rozdziału strumieni ładunków,
- zdolność zmiany postaci fizycznej materiałów (przetwarzanie),
- przekierowanie strumieni ładunków na różne kierunki w sieci logistycznej,
- łączenie sieci logistycznej z innymi sieciami i systemami logistycznymi.

Dodatkowo, cele i zadania procesu magazynowego oraz wynikający z nich sposób jego przebiegu uzależniony jest od takich cech funkcjonalnych, przestrzennych, technicznych i technologicznych obiektów magazynowych, jak np. [15], [74], [75], [84], [91], [117], [176], [184]:
- wielkość i pojemność (w funkcji technologii magazynowych),
- zastosowane technologie magazynowe (technologie transportu wewnętrznego i składowania),
- podział i zagospodarowanie przestrzeni magazynowej (np. rozmieszczenie i wielkość stref funkcjonalnych),
- organizacja pracy,
- sposób rejestracji i przekształcania strumieni informacji biznesowych,
- nakłady na działalność obiektu,
- założony minimalny poziom obsługi klientów,
- gospodarka zapasami, która jest wynikiem planowania zaopatrzenia i dostaw.

Procesy zlokalizowane w obiektach magazynowych będących elementami łańcuchów dostaw lub innych struktur systemów logistycznych mają za zadanie m.in. [59], [126], [158], [184], [198]:
- podtrzymywać ciągłość podstawowych procesów: produkcyjnego i konsumpcyjnego poprzez wyrównywanie (dopasowanie) ilościowe i czasowe strumieni materiałów,
- buforować (przechowywać) zapasy w wyodrębnionej przestrzeni magazynowej zgodnie z ustaloną technologią, za pomocą określonych środków technicznych i pracowników,
- realizować ostatnią fazę procesu produkcyjnego, polegającą na różnicowaniu dóbr,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- rozmieszczać zapas (obniżać koszty transportu i skracać czas reakcji na zapotrzebowanie na materiały),
- zwiększać dostępność dóbr dla odbiorców,
- agregować zapotrzebowanie,
- przekierowywać przepływy materiałowe,
- konsolidować strumienie materiałów,
- dokonywać rozdziału strumieni materiałów.

Jak zaznaczono w poprzednim rozdziale, proces magazynowy bardzo często traktowany jest jako sekwencja przekształceń dokonywanych na strumieniach materiałów i związanych z nimi informacji przez zasoby robocze. Wobec tego do celów i zadań procesu magaznowego można także zaliczyć realizację przez niego transformacji materiałów i informacji dotyczących np.:
- zmiany postaci logistycznej materiału bez zmiany postaci fizycznej SKU (przepakowanie, konsolidacja, dekonsolidacja),
- zmiany postaci fizycznej materiałów (łączenie SKU, montaż, konfekcjonowanie),
- zmiany postaci fizycznej i logistycznej,
- zmiany miejsca materiałów w przestrzeni – przewóz materiałów pomiędzy lokacjami w magazynie, przyjęcie i wydanie,
- przechowywania materiałów – składowanie,
- opóźniania przepływu materiałów związanego z przekazywaniem informacji i chwilową niemożnością wykonywania na nich kolejnych przekształceń – buforowanie, oczekiwanie,
- zmiany informacji logistycznej o materiałach (etykietowanie, inwentaryzacja, adresowanie itp.).

1.3. CEL I ZAKRES MONOGRAFII

W wyniku ciągle rosnącego zapotrzebowania społeczeństw na różnego rodzaju dobra materialne w ściśle określonym miejscu, czasie i postaci każde przedsiębiorstwo, w tym również logistyczne, musi ciągle usprawniać i optymalizować swoje procesy, tak aby oferowane przez nie dobra i usługi były dostarczane klientom szybko, przy zachowaniu odpowiednich kosztów i wysokich standardów jakości. Dziś niemal każde przedsiębiorstwo logistyczne posiada własne obiekty magazynowe lub zleca realizacje zadań magazynowych firmom zewnętrznym. To powoduje, iż utrzymanie wysokiej wydajności procesów magazynowych warunkuje poprawne i konkurencyjne funkcjonowanie tych przedsiębiorstw. Należy przy tym zauważyć, że rynek usług magazynowych nieustannie ewoluuje. Ciągły postęp w dziedzinie technologii nadaje tempo tym zmianom, a w efekcie

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

w obiektach magazynowych niezbędne jest wdrażanie nowych metod i narzędzi służących poprawie ich wydajności i efektywności. Niemniej jednak pośród wszechobecnego dążenia do ograniczania kosztów operacyjnych i eksploatacyjnych przy jednoczesnym zwiększaniu produktywności przedsiębiorstw nie można zapominać o bezpieczeństwie pracy i pracowników.

Bezpieczeństwo pracy, obok wydajności, niezawodności i poziomu generowanych kosztów, jest jednym z podstawowych czynników wpływających na ukształtowanie i organizację systemów logistycznych. Dotyczy to szczególnie systemów magazynowych, w których na niewielkiej przestrzeni, przy dużym zagęszczeniu zasobów pracy i znacznie ograniczonej widoczności realizowane są procesy transportu wewnętrznego (zazwyczaj znacząco zintensyfikowane). Takie systemy to w szczególności magazyny przemysłowe i dystrybucyjne, w których wykorzystywane są wózki widłowe różnych rodzajów, kierowane przez ludzi, mające znaczną masę, a dodatkowo w około 40%–50% przypadków poruszające się tyłem (ze względu na specyfikę środowiska pracy i realizowanych zadań). Warunki pracy w magazynach sprzyjają więc zagrożeniom związanym z kolizjami lub wypadkami, na które narażone są nie tylko osoby pracujące w magazynie, ale także ładunki i same konstrukcje magazynowe.

Uwzględnienie wszystkich wyżej wymienionych aspektów podczas kształtowania, wymiarowania czy też zarządzania obiektami magazynowymi i procesami w nich zachodzącymi jest współcześnie dużym wyzwaniem. Wymaga to umiejętności rozpoznania i skutecznego utrzymania szeregu kompromisów, takich jak np.:

- zwiększenie przepustowości obiektu magazynowego a obniżenie kosztów pracy,
- utrzymanie wysokiej gęstości składowania a zwiększenie efektywności wprowadzenia i wyprowadzenia jednostek materiałowych z obszarów składowania,
- utrzymanie procesów realizowanych ręcznie a wdrożenie automatyzacji,
- zwiększenie prędkości kompletacji a dokładność realizacja zadań i ograniczenie liczby błędów,
- utrzymania wysokich zapasów bezpieczeństwa a koszt utrzymania powierzchni magazynowej i zamrożenia kapitału,
- minimalizacja zapasów a koszty wynikające z braków materiałowych, zamówienia i oczekiwania na materiał,
- wydajność i efektywność procesów magazynowych a bezpieczeństwo realizujących je pracowników.

Ze względu na ważność tematyki jak i niewielką liczbę publikacji naukowych ją poruszających, w niniejszej monografii główna uwaga skupiona została na ostatnim z wyżej wymienionych „kompromisów magazynowych", czyli wydajności procesów magazynowych i bezpieczeństwie pracy w obiektach je realizujących. Jako cel zasadniczy monografii uznano *opracowanie metodyki modelowania procesów magazynowych umożliwiającej przeprowadzenie oceny wydajności i bezpieczeństwa pracy w magazynach.*

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Dodatkowo jako cele cząstkowe pracy przyjęto przedstawienie w niej szeregu badań oraz omówienie zagadnień obejmujących:

- identyfikację rodzajów i zadań obiektów magazynowych w rzeczywistych systemach logistycznych (łańcuchach transportowo-magazynowych, łańcuchach dostaw itp.),
- identyfikację zadań logistycznych stawianych przed tego typu obiektami,
- identyfikację typów procesów i czynności realizowanych w obiektach magazynowych,
- identyfikację zagrożeń dla bezpieczeństwa pracowników obiektów magazynowych,
- identyfikację metod, zasad i narzędzi do pomiaru i oceny wydajności oraz bezpieczeństwa w procesach magazynowych, a także oceny ryzyka zawodowego,
- omówienie metod budowania celowych modeli rzeczywistych procesów i obiektów magazynowych,
- opracowanie modeli matematycznych obiektów i procesów magazynowych umożliwiających ocenę wydajności i bezpieczeństwa pracy,
- przedstawienie wyników badań symulacyjnych procesów magazynowych uwzględniających ich bezpieczeństwo i wydajność.

Zakres monografii obejmuje 8 rozdziałów, z których trzy pierwsze stanowią wprowadzenie do tematyki procesów i systemów magazynowych, ich charakterystykę, a także wybrane aspekty modelowania. W rozdziale czwartym przybliżono problematykę wydajności i bezpieczeństwa w obiektach magazynowych, natomiast w kolejnych dwóch sformułowano modele matematyczne jej dotyczące. Dwa ostatnie rozdziały dotyczą wykorzystania modelowania matematycznego w ocenie wydajności i bezpieczeństwa w magazynach.

W pierwszym rozdziale monografii przedstawiono podstawowe pojęcia dotyczące procesów i systemów, a także odniesiono je do rzeczywistych systemów i procesów magazynowych. Omówiono tam ich definicje zawarte w literaturze problemu, wskazano podstawowe własności, zidentyfikowano strukturę, oraz interakcje z otoczeniem. Dodatkowo przedstawiono cele i zadania stawiane przed procesami magazynowymi oraz wskazano przesłanki, cel i zakres niniejszej monografii.

Drugi rozdział monografii dotyczy wybranych aspektów modelowania procesów magazynowych. Przedstawiono tam podstawowe pojęcia związane z modelem i modelowaniem, omówiono etapy konstruowania modeli procesów magazynowych, a także scharakteryzowano podstawowe ich rodzaje. W drugiej części rozdziału zidentyfikowano cele modelowania procesów magazynowych oraz przedstawiono przykłady modeli procesów i obiektów magazynowych w literaturze w podziale ze względu na cel badań i sposób ich wykorzystania.

W trzecim rozdziale analizie poddane zostały obiekty magazynowe i realizowane w nich procesy. Główna uwaga zwrócona została na klasyfikację magazynów

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

(ze względu na różnego rodzaju kryteria techniczne i funkcjonalne) oraz ich podstawowe charakterystyki. Następnie zidentyfikowano główne składowe procesu magazynowego w odniesieniu do transformowanego przez nie elementu oraz opisano ich podstawowe cechy i zadania.

Rozdział czwarty monografii dotyczy problematyki wydajności i bezpieczeństwa w obiektach magazynowych. Podzielono go na dwie części tematyczne. W pierwszej główna uwaga skupiona została na wydajność procesów magazynowych, przytoczono jej definicję, przedstawiono różne podejścia do jej estymacji. Dodatkowo omówiono wybrane sposoby i metody zwiększania wydajności procesów magazynowych dotyczące głównie zastosowania określonych technologii magazynowania i transportu wewnętrznego oraz odpowiedniej organizacji pracy w obiekcie magazynowym. Drugą część rozdziału czwartego poświęcono aspektom bezpieczeństwa w procesach magazynowych. Zidentyfikowano podstawowe zagrożenia na jakie narażeni są pracownicy magazynowi podczas realizacji przydzielonych im zadań, a także omówiono wybrane podejścia umożliwiające ograniczenie tych zagrożeń lub zredukowanie ich potencjalnych skutków. Rozdział zakończono przedstawieniem tematyki oceny ryzyka zawodowego w obiektach magazynowych. Zdefiniowano tam podstawowe pojęcia dotyczące bezpieczeństwa, zagrożenia oraz ryzyka, omówiono i zapisano formalnie miary ryzyka zawodowego, a także przedstawiono algorytm analizy i metody oceny tegoż ryzyka.

Rozdział piąty i szósty poświęcono modelom obiektów i procesów magazynowych. Najpierw zaprezentowano matematyczne odwzorowania struktury magazynów oraz zadań logistycznych w nich realizowanych, zapisano formalnie i sparametryzowano zasoby pracy, odwzorowano charakterystyki elementów struktury magazynów, a także przedstawiono organizację procesu magazynowego. Rozdział zakończono sformalizowaniem podstawowych kryteriów oceny procesu magazynowego. W rozdziale szóstym zaprezentowano wybrane modele matematyczne umożliwiające wielokryterialną ocenę procesu magazynowego ze względu na wydajność, bezpieczeństwo oraz koszty operacyjne. Modele uwzględniały możliwość poszukiwania ekstremów wymienionych wyżej kryteriów w wyniki zmiany rozmieszczenia jednostek asortymentowych w lokacjach magazynowych, wyboru trasy realizacji zadań magazynowych (sekwencji odwiedzanych miejsc składowania), a także doboru układu strefy składowania, organizacji w niej ruchu oraz doboru liczby zasobów pracy i maksymalnej prędkości z jaką mogły się poruszać.

W rozdziale siódmym zaprezentowano metody modelowania symulacyjnego jako narzędzia umożliwiające analizę i ocenę procesów magazynowych. Przedstawiono procedurę konstruowania modeli symulacyjnych, sposoby ich weryfikacji i walidacji, a także wskazano i krótko scharakteryzowano dostępne aktualnie na rynku narzędzia, które mogą zostać wykorzystane do budowy modeli i symulacji procesów magazynowych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W rozdziale ósmym przedstawiono praktyczne przykłady badania procesów magazynowych w aspekcie wydajności i bezpieczeństwa z zastosowaniem narzędzia FlexSim. Przedstawiono założenia ogólne do badań, omówiono parametry podstawowych elementów modelu oraz logikę jego działania. Następnie zaprezentowano warianty ukształtowania i organizacji procesu magazynowego, na którym przeprowadzono eksperymenty symulacyjne. Na zakończenie przedstawiono, porównano ze sobą i przeanalizowano uzyskane wyniki badań.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

2 WYBRANE ASPEKTY MODELOWANIA PROCESÓW MAGAZYNOWYCH

2.1. MODEL I MODELOWANIE

W rozdziale 1.1 omówione zostały podstawowe pojęcia związanie z modelowaniem – *obiekt, system, proces*. Każde z nich jest przedmiotem badań i zainteresowań wielu różnych badaczy. Badacze na potrzeby realizowanych przez siebie prac mogą eksperymentować na rzeczywistych obiektach, systemach czy procesach. Często jednak obiekty badań nie istnieją, są dopiero planowane lub są w fazie projektowej. W takich przypadkach testy można prowadzić na prototypach lecz jest to zarówno kosztowne, jak i czasochłonne. Zdarza się także, iż badanie nawet istniejących systemów, obiektów czy procesów jest trudne bądź praktycznie niemożliwe do wykonania, np.: w rzeczywistych systemach ekonomicznych niemożliwe jest dowolne modyfikowanie popytu i podaży, eksperymentowanie z różną organizacją bądź wyposażeniem obiektów logistycznych mogłoby uniemożliwić im realizację bieżących zadań na odpowiednim poziomie jakości itp. [148]. W takich sytuacjach buduje się modele procesów (systemów, obiektów), na których później prowadzone są badania.

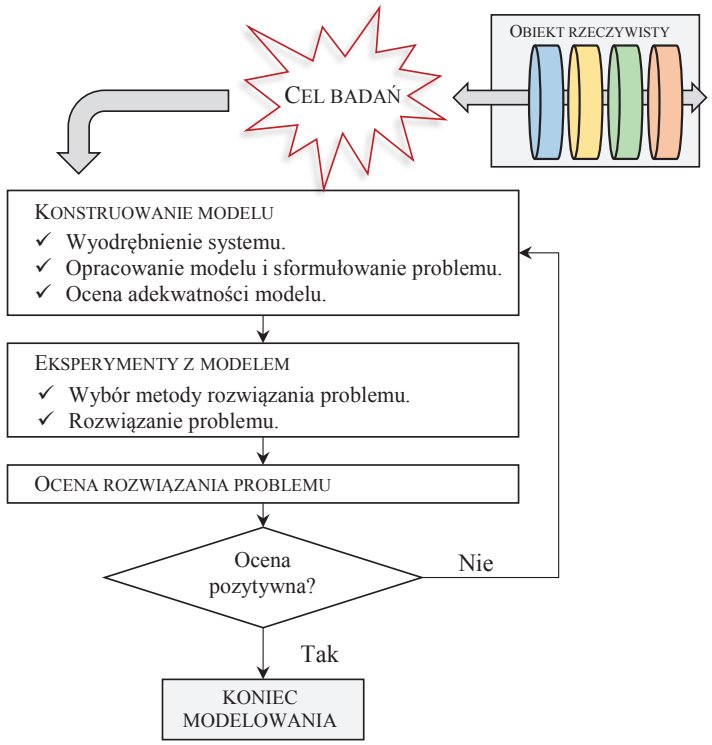
Model systemu może być zdefiniowany jako ilościowa i jakościowa reprezentacja systemu na innej bazie materialnej niż występuje on w rzeczywistości, ujmująca podstawowe cechy systemu, istotne ze względu na zamierzony cel badań [94], [123], [149], [169]. Proces opracowania modelu i eksperymentowania na nim nazywany jest *modelowaniem* (rys. 2.1). Wobec powyższego modelowanie można zdefiniować jako odwzorowanie systemu, procesu bądź zjawiska fizycznego w postaci modelu ujmującego jego podstawowe cechy oraz eksperymentowanie z nim. Proces taki pozwala istotnie przyspieszyć i uprościć badania, a także zmniejszyć ich koszt [9], [10], [41], [94], [123], [149], [169].

Autor publikacji [79] zauważa, że model może być formalnym przedstawieniem teorii lub też formalnym opisem empirycznej obserwacji (bądź kombinacją powyższych). Odnosząc się do systemów, Gordon w [88] stwierdza, że model to zbiór informacji o systemie, zebranych w celu jego zbadania.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Ze względu na różnorodność prowadzonych badań i związanych z tym celów modelowania nie istnieje jeden standardowy model. Można wyróżnić wiele ich typów. Różni badacze opracowują różne typy modeli w zależności od rozwiązywanego problemu i celu jaki chcą z ich wykorzystaniem osiągnąć. Niemniej jednak każdy model powinien [79]:

- umożliwiać badaczowi sprawdzenie swoich teoretycznych przekonań o systemie, dokonania na nim empirycznych obserwacji oraz wyciągnięcia z tych poczynań logicznych wniosków;
- ułatwiać zrozumienie systemu;
- skłaniać do prowadzenia w przyszłości badań szczegółowych;
- przyspieszać wykonanie analizy;
- określać metody testowania pożądanych modyfikacji systemu;
- ułatwiać manipulowanie charakterystykami wejściowymi;
- umożliwiać prowadzenie kontroli o wiele większej liczby źródeł zmienności, niż byłoby to możliwe przy bezpośrednim badaniu systemu;
- obniżać koszt badań w porównaniu z badaniami prowadzonymi na rzeczywistym systemie.



Rys. 2.1. Schemat procesu modelowania

Źródło: opracowanie własne.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Więcej szczegółów dotyczących celów modelowania (na przykładzie procesów logistycznych) przedstawiono w rozdziale 2.3.

We współczesnym podejściu do modelowania systemów wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje modeli: modele fizyczne oraz modele symboliczne. Pierwsze z nich są to układy (systemy), których działanie odwzorowuje działanie rzeczywistego systemu przez wykorzystanie innych wielkości fizycznych w innej skali. Mogą to być np.: model redukcyjny samolotu bądź statku wykorzystywany do badań aerodynamicznych podczas jego projektowania, makieta miasta, na której analizowane będą możliwe skutki różnych rozwiązań komunikacyjnych, symulator lotu do szkolenia pilotów. Modelami symbolicznymi systemów nazywać będziemy ich opisy w języku formalnym, zależnym od metody badania systemu. W przypadku, gdy symboliczny model systemu opisuje ilościowe i jakościowe związki pomiędzy cechami systemu (wyrażającymi istotne, z punktu widzenia celu jego badania, właściwości systemu), będziemy mieli do czynienia z *modelem matematycznym systemu*. Takie modele odwzorowują systemy rzeczywiste za pomocą zbioru symboli i relacji oraz mogą być wyrażone przy użyciu wzorów, zestawu wykresów bądź tablic. Istotnym jest, aby każda z tych postaci zawierała wszystkie, niezbędne do rozwiązania problemu wynikającego z celu badań, informacje o badanym systemie [3], [9], [10], [21], [41], [53], [78], [94], [123], [149], [150], [151], [194], [199], [233], [267], [308].

Do badania systemów z użyciem modeli matematycznych wykorzystane może zostać *modelowanie matematyczne*. Polega ono na odwzorowaniu rzeczywistego systemu w postaci możliwego do przyjęcia zamiennika (ujmującego wszystkie zachodzące w badanym systemie zjawiska w postaci relacji matematyczno-logicznych) i wykorzystaniu aparatu matematycznego do jego analizy [148]. W procesie modelowania matematycznego (badania systemów z użyciem modeli matematycznych) można wyróżnić kilka podstawowych etapów [94], [149]:

- *Określenie celu badań* – pytań, na które chcemy uzyskać odpowiedź.
- *Wyodrębnienie systemu* z istniejącej rzeczywistości.
- Opracowanie modelu systemu i sformułowanie problemu.
- Ocena adekwatności modelu.
- Wybór metody rozwiązania problemu.
- Rozwiązanie problemu.
- Ocena rozwiązania.

Etapy modelowania matematycznego są silnie ze sobą związane. Na potrzeby poprawności badań powinny być realizowane w określonej sekwencji. Dodatkowo należy zauważyć, że proces budowy modelu matematycznego ma charakter iteracyjny. Zawsze po zakończeniu określonego etapu modelowania, gdy otrzymane wyniki nie są zgodne z danymi doświadczalnymi, nie umożliwiają realizacji celu badań (udowodnienia bądź obalenia postawionej hipotezy

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

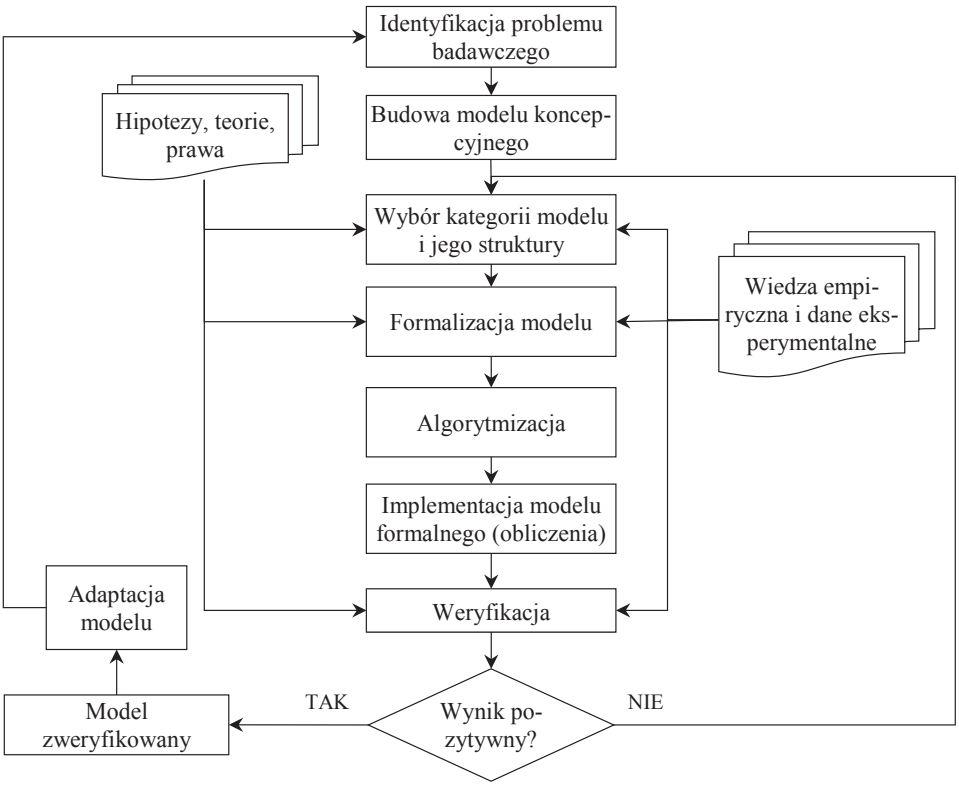
badawczej) lub przekroczone zostaną możliwości obliczeniowe, konieczny jest powrót do odpowiedniego etapu wcześniejszego. Wówczas należy przeprowadzić modyfikacje jego założeń w odpowiednim kierunku (rys. 2.1, rys. 2.2) [41], [94], [149].

Iteracyjny charakter procesu modelowania charakteryzuje się tym, iż rozpoczyna się on od opracowania modelu o najmniejszej możliwej złożoności (szczegółowości), następnie jest on uszczegóławiany w kolejnych etapach, aż do otrzymania modelu właściwego, o poziomie szczegółowości umożliwiającym realizację celu badań. Kolejne etapy budowy modelu to (rys. 2.2) [94], [123], [128], [169], [184]:

- *Identyfikacja* – wyodrębnienie istotnych dla modelowania fragmentów rzeczywistości, opracowanie założeń i ustalenie elementów modelu, ustalenie celów modelowania.
- *Budowa modelu koncepcyjnego* – transformacja zbioru założeń do postaci modelu koncepcyjnego, ustalenie relacji między zidentyfikowanymi elementami i cech pozwalających na jednoznaczny opis.
- *Formalizacja modelu* – wybór kategorii modelu matematycznego, zapis niesprzecznych zależności matematycznych, związków logicznych i symbolicznych opisujących relacje między zidentyfikowanymi elementami i ich cechy. Opracowanie struktury zmiennych decyzyjnych i ograniczeń modelu matematycznego.
- *Konstruowanie celowych zadań optymalizacyjnych* – w oparciu o zidentyfikowane cele modelowania.
- *Algorytmizacja modelu* – transformacja modelu formalnego w plan systematycznego postępowania mający doprowadzić do rozwiązania celowych zadań optymalizacyjnych sformułowanych w modelu.
- *Implementacja modelu formalnego* – przetworzenie modelu algorytmicznego do postaci umożliwiającej realizację powtarzalnych eksperymentów opartych na tych samych zasadach logicznych co model matematyczny. W przypadku modelu matematycznego predystynowaną formą implementacji jest program komputerowy.
- *Weryfikacja modelu* – polega na ocenie dostosowania modelu do rozwiązywanego problemu. O modelu można powiedzieć, że jest użyteczny, gdy jest adekwatny do modelowanego obiektu i potwierdza doświadczenie empiryczne. Sposób weryfikacji zależy od rodzaju modelu. Weryfikacja modelu obejmuje etapy walidacji i kalibracji modelu.
- *Adaptacja modelu* – polega na przeprowadzeniu programu eksperymentów obejmujących różne sytuacje decyzyjne i różne możliwe konfiguracje elementów modelu – w zależności od celu badań. Adaptacja pozwala ustalić zakres, warunki stosowalności i możliwości posługiwania się modelem.

Procedurę konstruowania modelu matematycznego przedstawiono na rys. 2.2.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 2.2. Procedura konstruowania modelu matematycznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [184].

2.2. TYPY MODELI

Model jest stosowany jako zastępnik systemów, obiektów lub procesów rzeczywistych jeśli badanie ich właściwości w warunkach rzeczywistych nie jest możliwe (ze względów ekonomicznych, technicznych czy też bezpieczeństwa systemu lub jego użytkowników). Jak zaznaczono w rozdziale 2.1, każdy model charakteryzuje się celowością. Bardzo często cel, dla którego model był konstruowany, jest podstawą wyróżnienia różnych jego klas. Często stosowanymi kryteriami umożliwiającymi klasyfikację modeli są [311]:

- zakres modelowania,
- jakość uzyskiwanego rozwiązania,
- sposób odwzorowania związków między stanami systemu,
- sposób odwzorowania charakterystyk elementów systemu,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- postać parametrów oraz równań modelu,
- ciągłość parametrów modelu
- wielkość badanego systemu.

Kryterium zakresu modelowania pozwala wyodrębnić *modele cybernetyczne,* których istotą są informacyjno-decyzyjne uwarunkowania modelowanych systemów. Podejście takie polega na wyróżnieniu podsystemu zarządzania, przy czym zarządzanie wprowadza do modelu procesy informacyjno-decyzyjne [33], [311].

Biorąc pod uwagę kryterium jakości uzyskiwanego rozwiązania można wyróżnić *modele optymalizacyjne, symulacyjne i heurystyczne* [48].

W zależności od sposobu odwzorowania związków między stanami modelowanego systemu, modele mogą zostać podzielone na modele *statyczne* oraz *dynamiczne*.

Sposób odwzorowania charakterystyk elementów systemu pozwala wyróżnić wśród modeli modele *deterministyczne* i s*tochastyczne*, w tym *probabilistyczne*, *statystyczne* i *strategiczne*.

Procesy odwzorowywane w modelu zazwyczaj nie są dokładnym odzwierciedleniem zjawisk fizycznych, lecz przedstawiają aktualny stan wiedzy o nich. Często zagadnienia optymalizacji dynamicznej przez dyskretyzację zmiennej czasowej sprowadzane są do optymalizacji statycznej. Ze względu na sposób odwzorowania czasu modele te dzielą się na *ciągłe* oraz *dyskretne* względem czasu [33], [145].

Uwzględniając kryterium wielkość badanego systemu wyróżniamy modele: *submikroskopowe, mikroskopowe, mezoskopowe, makroskopowe.*

W publikacji [199] B. Mielczarek dokonuje następującego podziału modeli:
- modele analityczne/numeryczne,
- modele preskryptywne/opisowe,
- modele dyskretne/ciągłe,
- modele stochastyczne/deterministyczne,
- modele statyczne/dynamiczne,
- modele otwarte/zamknięte.

Nieco odmienny sposób klasyfikacji modeli z punktu widzenia zastosowania ich do odwzorowania obiektów i procesów logistycznych przedstawiono w pracy [184]. Autor zauważa, iż ze względu na uproszczenie odwzorowania obiektu modelowania, rozróżnia się modele ([184] za [123], [239]):
- opisowe, przedstawiające właściwości obiektu werbalnie,
- fizyczne, odwzorowujące działanie rzeczywistego obiektu (pozwalającego na bezpośrednie badania eksperymentalne) przez wykorzystanie wielkości fizycznych w innej skali,
- analogowe, wykorzystujące możliwości przedstawiania jednych właściwości za pomocą innych,
- matematyczne, ujmujące wszystkie istotne zjawiska w obiekcie modelowania w postaci relacji matematyczno-logicznych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W tabeli 2.1 (na s. 31) przedstawiono ogólną klasyfikację modeli, które mogą mieć zastosowanie w badaniu obiektów magazynowych oraz realizowanych w nich procesów logistycznych. Natomiast poniżej scharakteryzowano podstawowe typy modeli.

Modele analityczne/numeryczne

W modelu analitycznym rozwiązanie problemu uzyskiwane jest na podstawie badań zależności, które zapisano za pomocą wzorów i formuł matematycznych. Modele numeryczne dostarczają natomiast rozwiązań w wyniku wykonania szeregu operacji na liczbach. Otrzymywane w ten sposób wyniki są na ogół przybliżone.

Modele preskryptywne/opisowe

Modele preskryptywne są wykorzystywane w celu sformułowania i optymalizacji konkretnego problemu. Ich zadaniem jest więc dostarczanie jednego, najlepszego rozwiązania. Modele opisowe charakteryzują zachowanie się systemu poprzez wyznaczenie oszacowań badanych zmiennych wyjściowych. Modele symulacyjne to najczęściej modele opisowe (deskryptywne), natomiast modele preskryptywne zaliczane są do modeli analitycznych [199].

Modele optymalizacyjne

Modele optymalizacyjne są pewną odmianą modeli matematycznych. Do odwzorowania rzeczywistości wykorzystywane są w nich zależności matematyczne i logiczne. Przedstawiane są one w postaci zadań optymalizacyjnych. Oznacza to, że w ich opisie zawarte są dane, parametry, zmienne decyzyjne oraz sformalizowane matematycznie ograniczenia i kryteria oceny. W wyniku wykorzystania poprawnie skonstruowanego modelu optymalizacyjnego możliwe jest uzyskanie rozwiązania optymalnego, czyli najlepszego z punktu widzenia przyjętych kryteriów i ograniczeń dla danego problemu.

Modele symulacyjne

Modele symulacyjne to kolejna podgrupa (klasa) modeli matematycznych. Jak wskazuje nazwa, konstruowane są one na potrzeby badań symulacyjnych. Modele symulacyjne umożliwiają naśladowanie procesu zachodzącego w systemie. To w efekcie prowadzi do uzyskania informacji, które można przenieść w obszar rzeczywistości. Modele symulacyjne są pomocne w przypadku konieczności zidentyfikowania skutków różnych decyzji, zarówno podczas projektowania, jak i analizy istniejących rozwiązań. Dodatkowo mogą być one wykorzystywane również na potrzeby zarządzania.

Modele symulacyjne stosowane są zazwyczaj, gdy nie ma możliwości wykorzystania metod analitycznych. Są one szczególnie użyteczne w przypadku badania złożonych systemów (należą do nich m.in.: procesy transportowe, logistyczne i magazynowe). Ze względu na sposób przeprowadzania symulacji, metody

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

symulacyjne są dzielone na metody z ustalonym krokiem oraz metody zdarzeniowe. W metodach z ustalonym krokiem obliczenia symulacyjne wykonywane są okresowo, natomiast w metodach zdarzeniowych jedynie w chwilach wystąpienia jednego ze zdefiniowanych zdarzeń [33], [145]. Więcej informacji na temat modeli i metod symulacyjnych przedstawiono w rozdziale 7.1.

Modele heurystyczne

Modele heurystyczne wykorzystywane są często na potrzeby prognozowania oraz w procesach podejmowania decyzji. Ich nazwa pochodzi od greckiego słowa *heusisco*, co oznacza umiejętność znajdywania, poszukiwania. Modele heurystyczne wykorzystują niekonwencjonalne twórcze sposoby rozwiązywania problemów. Za ich pomocą można dochodzić do nowych rozwiązań i nowych prawd naukowych. Czynności rozwiązywania problemów metodami heurystycznymi sprowadzają się do [13]:

- identyfikacji problemu (zadania),
- wyboru koncepcji poszukiwań,
- zbierania informacji,
- poszukiwania idei (metody) rozwiązania wyłonionego problemu (postawionego zadania),
- opracowania wariantów rozwiązania,
- wdrożenia wybranego wariantu rozwiązania do praktyki.

Metody heurystyczne są szczególnie użyteczne, gdy badane zjawisko nie zostało dobrze rozpoznane lub też w sytuacji, jeśli złożoność obliczeniowa modeli optymalizacyjnych uniemożliwia ich stosowanie. W takich sytuacjach konieczne jest posługiwanie się metodami przybliżonymi, które umożliwiają uzyskanie rozwiązania przybliżonego [297].

Modele statyczne/dynamiczne

Modelami statycznymi nazywane są modele odwzorowujące system i otoczenie w ustalonym stanie [123], [169]. Wobec tego modele statyczne są modelami prezentującymi system w ustalonym czasie. Systemy zmienne w czasie mogą być odwzorowywane przez modele statyczne tylko gdy pozostają one w równowadze. Najczęściej są stosowane w badaniach operacyjnych, służących do podejmowania decyzji w systemach sieciowych, np.: masowej obsługi, podziału ograniczonych zasobów, wyznaczania ścieżek krytycznych przemieszczania się w sieci tak, aby koszty lub czas były minimalne [33], [145]. W modelach tego typu zamiast zmiennych wejścia i wyjścia stosuje się zazwyczaj zmienne decyzyjne i funkcję celu. Modele dynamiczne ujmują w swoim opisie upływ czasu [5], [6], [7], [123], [169], budowane są z uwzględnieniem interakcji między elementami systemu i są podstawą zapisu równań, które przedstawiają wzajemne zależności zmiennych wejścia, stanu i wyjścia systemu.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Podsumowując, podstawowa różnica pomiędzy modelami statycznymi i dynamicznymi zależy głównie od tego czy i w jaki sposób uwzględniany jest w nich upływ czasu. W modelu statycznym albo pomijany jest udział czasu, albo też opisywany jest chwilowy stan systemu w pewnym momencie. W modelu dynamicznym wyraźnie podkreślany jest upływ czasu, co pozwala obserwować zmiany pojawiające się w systemie w kolejnych chwilach.

Modele dyskretne/ciągłe

Podział modeli na dyskretne i ciągłe wynika ze zmiennych występujących w modelu. Zmienne ciągłe mogą przyjmować wartość każdej liczby rzeczywistej, podczas gdy zmienna dyskretna przyjmuje wartości tylko z pewnego, ściśle określonego przeliczalnego podzbioru liczb rzeczywistych. Szczególnie istotny jest tutaj charakter zmiennej czasu. Jeżeli zmiany w modelu występują w sposób ciągły w miarę upływu czasu, to określamy model jako ciągły. Jeżeli natomiast zmiany występują tylko w ściśle określonych chwilach, to jest to model dyskretny [199].

W modelach dynamicznych może być dodatkowo uwzględnione rozłożenie wartości parametrów w przestrzeni. Tego typu modele nazywane są modelami o parametrach rozłożonych w przestrzeni [33], [145]. Dodatkowo, na uwagę zasługuje fakt, iż w rzeczywistości niewiele jest systemów, które są wyłącznie ciągłe lub dyskretne. Często trudno jest je jednoznacznie sklasyfikować. Przykładowo, proces transportu jednostki materiałowej z użyciem przenośnika może przebiegać w sposób ciągły, ale początek i koniec tegoż procesu (załadunek i rozładunek przenośnika) zazwyczaj są zjawiskami dyskretnymi.

Modele stochastyczne/deterministyczne

W zależności od sposobu odwzorowania charakterystyk elementów systemu wyróżniane są modele: deterministyczne i stochastyczne, w tym probabilistyczne, statystyczne i strategiczne.

Modele probabilistyczne, stochastyczne oraz statystyczne charakteryzują się tym, iż odwzorowują niepewność informacji o własnościach charakterystyk elementów struktury systemu i otoczenia. Dodatkowo, modele probabilistyczne w odróżnieniu od stochastycznych pozwalają uzyskać rozwiązanie bez konieczności przeprowadzania eksperymentów, które polegają na wprowadzeniu do modelu losowych przebiegów.

W przypadku założenia, że wszystkie informacje o własnościach systemu i otoczenia są pewne, wówczas mamy do czynienia z modelami deterministycznymi. Oznacza to, że w modelach deterministycznych oraz strategicznych opis systemu i otoczenia nie zawiera zmiennych losowych, zaś każdej decyzji odpowiada jedna wartość funkcji celu, przy czym w modelach strategicznych dla wybranych parametrów ustalone są zbiory rozpatrywanych wartości [33], [145].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Modele otwarte/zamknięte

W modelach otwartych uzyskane wyniki nie są wykorzystywane do prowadzenia modyfikacji danych wejściowych w celu poprawy wyników. W modelach zamkniętych wyniki porównuje się z założonym celem, czego konsekwencją jest modyfikacja danych wejściowych tak, aby uzyskać postawiony cel [199].

Modele submikroskopowe/mikroskopowe/mezoskopowe/makroskopowe

Klasyfikacja modeli ze względu na wielkość badanego systemu, procesu czy też obiektu umożliwia wyróżnienie czterech podstawowych typów takich modeli: makroskopowych, mezoskopowych, mikroskopowych i submikroskopowych. Ich charakterystykę można przedstawić na przykładzie modeli ruchu czy modeli systemów transportowych. Przy takim podejściu modele makroskopowe znajdują zastosowanie tam, gdzie nie jest wymagana szczegółowa informacja o zachowaniu poszczególnych pojazdów, lecz wyłącznie ogólna ocena jakościowa ruchu na większej i bardziej złożonej konfiguracji sieci drogowej, a więc w planowaniu regionalnym. Z kolei modele mikroskopowe umożliwiają otrzymanie teoretycznie szacunkowych, ale wiarygodnych informacji o zachowaniu pojedynczych pojazdów. Z tego powodu można je stosować głównie w odniesieniu do mniejszych zakresowo układów komunikacyjnych, ale o większym poziomie szczegółowości [187].

Modele mikroskopowe wykorzystywane są do modelowania dynamiki pojedynczych jednostek transportowych w dowolnym przedziale czasowym. W modelach tych podczas symulacji ruchu potoku jednostek transportowych uwzględnia się największą liczbę parametrów opisujących zarówno zachowanie kierującego, jak i jednostki transportowej w potoku w sposób deterministyczny. Poprzez odpowiednie warunki brzegowe określa się zachowanie jednostki transportowej w potoku w sytuacjach takich, jak: dostosowanie prędkości jazdy do panujących ograniczeń, zmiana pasa ruchu, wyprzedzanie i włączanie się do ruchu. Opisywany jest również sposób realizacji interakcji związanych z zachowaniem innych jednostek transportowych w potoku ruchu. Ograniczenia wynikające z zasad jazdy umożliwiają symulację ruchu potoku jednostek transportowych z wykorzystaniem modeli mikroskopowych w sieciach transportowych, sterowanych lub niesterowanych [33], [145].

Z mezoskopowymi i makroskopowymi modelami potoku jednostek transportowych mamy do czynienia, gdy analizowane są duże sieci transportowe lub gdy można pominąć zależności występujące między poszczególnymi pojazdami w potoku. Zarówno modele mezoskopowe, jak i makroskopowe pozwalają uwzględniać znaczną liczbę parametrów opisujących ruch potoku jednostek transportowych, jednak charakterystyki pojedynczej jednostki transportowej w potoku mogą być stochastyczne. Grupa modeli makroskopowych charakteryzuje się najmniejszą szczegółowością opisu, co oznacza, że ruchy pojedynczych jednostek transportowych nie są w modelach tej grupy jawnie uwzględniane [33], [145].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W publikacjach [33], [145] zauważono również, że modele submikroskopowe mogą być wykorzystywane do analiz zachowania się jednostki transportowej w ściśle określonych warunkach drogowych, np. podczas jazdy po łuku czy jazdy po podłożu o zmniejszonej przyczepności. Wykorzystuje się je także do optymalizacji działania układów stabilizacji jazdy, analizy dynamiki jednostki transportowej, jego stateczności itp.

Ogólną klasyfikację modeli w zastosowaniu do modelowania magazynów przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Ogólna klasyfikacja modeli w zastosowaniu do modelowania magazynów

Kryterium podziału	**Rodzaje modeli obiektów (np. magazynowych)**	
Cel, przeznaczenie	• Modele wyjaśniające • Modele oceniające	• Modele decyzyjne • Modele prognostyczne
Jakość uzyskiwanego rozwiązania	• Optymalizacyjna • Symulacyjne	• Heurystyczne
Język opisu	• Modele werbalne (opisowe) • Modele matematyczne (zapisy analityczne, formalizm matematyczny, logika)	• Modele logiczne (zapisy algebraiczne, logiczne i symboliczne) • Modele fizyczne (odwzorowanie obiektu w postaci fizycznego zastępnika)
Charakter cech	• Modele stochastyczne – probabilistyczne • Modele stochastyczne – statystyczne • Modele stochastyczne – strategiczne	• Modele dynamiczne • Modele deterministyczne
Zmienność stanów w czasie, ciągłość	• Modele statyczne • Modele dynamiczne	• Modele dyskretne • Modele ciągłe
Implementacja modelu	• Symulacja • Programowanie matematyczne	• Zamiennik fizyczny
Zastosowanie	• Strukturalne • Funkcjonalne	• Rozwojowe

Źródło: opracowanie własne na podstawie prac: [94], [123], [128], [135], [152], [169], [184], [223], [273], [311].

2.3. CELE MODELOWANIA PROCESÓW MAGAZYNOWYCH

Modelowanie procesów magazynowych ma na celu budowę modelu procesu, który pozwoli na badanie zachowania się systemu magazynowego w czasie, zarówno

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

w bieżących warunkach eksploatacyjnych, jak podczas prac projektowych. Wobec tego istotą modelowania procesów magazynowych jest badanie związków między zadaniami systemu, jego wyposażeniem oraz organizacją działania, które są zmienne w czasie oraz zależą od specyfiki realizowanego zadania logistycznego oraz interakcji magazynu z otoczeniem. To powoduje, iż problematyka modelowania procesów magazynowych dotyczy zarówno aspektów technicznych, techniczno-technologicznych jak i organizacyjnych. W każdym z wymienionych obszarów występują problemy decyzyjne, których rozwiązanie wymaga uwzględnienia przy wyborze sposobu (technologii) realizacji procesu magazynowania ładunków szeregu ograniczeń i zaleceń.

Jak zauważono w rozdziale 2.1 każdy model, w tym model obiektu czy procesu magazynowego, charakteryzuje się celowością. Oznacza to, że muszą one spełniać określone cele i zadania, do realizacji których zostały skonstruowane.

Wśród celów modelowania procesów logistycznych (w tym procesów magazynowych) można wyróżnić cele poznawcze i utylitarne. *Cele poznawcze* dotyczą m.in. [145], [169], [184]:

- uporządkowania informacji o procesach logistycznych realizowanych w obiektach magazynowych bez ingerencji we właściwości tych obiektów,
- identyfikacji istotnych elementów i właściwości procesów logistycznych realizowanych w obiektach magazynowych,
- identyfikacji związków i zależności między wielkościami występującymi w badanym procesie logistycznym (procesie magazynowym),
- identyfikacji przebiegu zmienności poszczególnych wielkości, tj. wyznaczenie przestrzeni stanów dopuszczalnych procesu logistycznego,
- kreowania nowych rozwiązań technologiczno-organizacyjnych poszczególnych elementów procesów logistycznych, jak również obszarów funkcjonalnych obiektów magazynowych, w których te procesy są realizowane,
- wskazania zmian zachodzących w istniejących obiektach logistycznych i procesach magazynowych, tak aby realizowały one określony cel badań.

Za *cele utylitarne* modelowania procesów logistycznych w obiektach magazynowych należy uznać [145], [169], [184] m.in.:

- poszukiwanie rozwiązań optymalnych w zakresie konfiguracji i organizacji procesu magazynowego,
- analizę lub ocenę organizacji procesu magazynowego prowadzące do racjonalnego doboru najkorzystniejszego wyposażenia technologiczno-organizacyjnego systemu magazynowego z punktu widzenia realizowanych przez niego zadań logistycznych,
- planowanie zmian wyposażenia techniczno-organizacyjnego systemu magazynowego,
- harmonogramowanie przebiegu procesu magazynowego przy uwzględnieniu zmienności i losowości zadań logistycznych systemu magazynowego,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- sterowanie przebiegiem procesu magazynowego, przy zadanym jego stanie początkowym, określonej strukturze wejść i wyjść oraz przyjętych kryteriach oceny jakości przebiegu procesu,
- badanie wydajności i efektywności kosztowej procesu magazynowego w funkcji zastosowanych technologii i technik organizacji,
- badanie szeroko pojętej jakości realizacji zadań logistycznych,
- poszukiwanie optymalnego przydziału zasobów do zadań obiektu i procesu magazynowego oraz ich rozkład w czasie,
- racjonalizacja (skrócenie) czasu realizacji zadań logistycznych stawianych przed obiektem i procesem magazynowym oraz reakcji obiektu na zapotrzebowanie klientów,
- minimalizacja jednostkowych kosztów przejścia jednostek materiału przez badany obiekt magazynowy, proces magazynowy lub ich wybrane obszary,
- planowanie zmian w konfiguracji i organizacji procesu i obiektu magazynowego z punktu widzenia konieczności ich modernizacji lub rozbudowy,
- zwiększanie wydajności oraz efektywności obiektu i procesu magazynowego,
- ocenę (i poprawę) bezpieczeństwa w obiektach magazynowych, wynikające z organizacji pracy (konfiguracji i organizacji elementów składowych procesu magazynowego) oraz wykorzystanych środków, narzędzi i technologii zmniejszających ryzyko zagrożeń zdrowia i życia pracowników magazynowych.

Przedstawione powyżej cele przyświecały wielu badaczom w prowadzonych przez nich analizach. W ich wyniku w literaturze problemu można odnaleźć wiele publikacji i przykładów, w których zaprezentowano różne podejścia, założenia i sposoby wykorzystania modeli obiektów i procesów magazynowych. W tabeli 2.2 zestawiono przykłady modeli procesów i obiektów magazynowych w literaturze w podziale ze względu na cel badań i sposób ich wykorzystania.

Tabela 2.2. Przykłady modeli procesów i obiektów magazynowych w literaturze w podziale ze względu na cel badań i sposób ich wykorzystania

Kryterium podziału	Cel badań i sposób wykorzystania modeli obiektów i procesów magazynowych	Przykłady opracowań
Obszar zastosowania, aspekt	Dobór i wymiarowanie technologii magazynowych i transportu wewnętrznego	[8], [107], [113], [166], [167], [168], [172], [186], [238], [249], [253]
	Ukształtowanie obiektów magazynowych, konfiguracja obszarów funkcjonalnych w nich zawartych	[24], [83], [165], [175], [225], [287], [292], [311]
	Organizacja i harmonogramowanie procesu magazynowego	[171], [176], [179], [181], [300]

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 2.2. cd.

Kryterium podziału	Cel badań i sposób wykorzystania modeli obiektów i procesów magazynowych	Przykłady opracowań
Obszar zastosowania, aspekt	Modelowanie elementów składowych procesu magazynowego (głównie procesy kompletacji) w ujęciu wydajności i efektywności procesu	[34], [55], [67], [86], [87], [103], [139], [140]
	Modelowanie przestrzeni magazynowych w ujęciu architektonicznym i technologicznym	[15], [20], [47], [77], [116], [172], [180]
	Przydział asortymentu do miejsc składowania i oferowania	[143], [146], [178], [193], [227], [305]
	Procesy specjalistyczne (np. cross-docking)	[130], [144], [180], [292]
	Bezpieczeństwo pracy w obiektach magazynowych	[36], [65], [142], [291]
	Planowanie dostaw (zaopatrzenie) i procesy przetwarzania poleceń wydania (wysyłka), gospodarka materiałowa i zarządzanie zapasem	[37], [38], [54], [89], [109], [201], [206], [288]
	Niezawodność techniczna urządzeń i systemów transportu wewnętrznego	[154], [167], [218], [219]
	Niezawodność procesów magazynowych w sensie funkcjonalnym	[17], [22], [44], [173], [177], [195], [260]
	Elementy systemów teleinformatycznych magazynów oraz systemów informacyjnych	[110], [261], [272]
	Aspekty efektywności rozwiązań	[106], [131], [158], [176], [228]
Implementacja modelu	Symulacja	[35], [120], [135], [136], [156], [188], [196], [208], [296]
	Programowanie matematyczne	Powszechnie stosowane
	Zamiennik fizyczny	Nieuzasadnione stosowanie
Etap zastosowania	Projektowanie nowego obiektu magazynowego	[91], [101], [102], [117]
	Cele organizacyjne i controllingowe	[74], [293]
	Reorganizacja i rozwój istniejącego obiektu magazynowego	[46], [127], [252]

Źródło: opracowanie własne na podstawie [174].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

3 OBIEKTY MAGAZYNOWE I REALIZOWANE W NICH PROCESY

3.1. OBIEKTY MAGAZYNOWE I ICH RODZAJE

Obiekty magazynowe bardzo często traktowane są jako punktowe obiekty infrastruktury transportowo-logistycznej zdolne do realizacji zadań związanych z dystrybucją dóbr fizycznych, ich składowaniem, buforowaniem, przemieszczaniem, przetwarzaniem itp. Duża liczba i różnorodność zadań jakie pełnią dla otoczenia obiekty logistyczne, a także wynikające z tego różnorodność ich budowy, organizacji i zastosowanej technologii determinują znaczną liczbę ich rodzajów.

Sposoby klasyfikacji magazynów odnoszą się zazwyczaj do kryteriów *technicznych*, związanych ze stosowanymi technologiami oraz organizacją tych obiektów oraz kryteriów *funkcjonalnych*, związanych z rolą jaką pełnią dla otoczenia, jak umiejscowione są względem podmiotów wytwórczych oraz klientów ostatecznych itp.

Jako podstawowe kryteria techniczne klasyfikacji obiektów magazynowych wyróżnia się:
- postać logistyczną obsługiwanych materiałów,
- układ funkcjonalny magazynu,
- warunki przechowywania ze względu na cechy materiałów,
- typ zabudowy i wysokość budynku,
- sposób sterowania przepływem materiałów i informacji,
- stopień mechanizacji i automatyzacji,
- liczbę kondygnacji.

Do głównych kryteriów funkcjonalnych zaliczane są:
- umiejscowienie magazynu względem podmiotu wytwórczego,
- poziom w systemie dystrybucji dóbr (producenci, dystrybutorzy kolejnych szczebli, konsumenci),
- rotacja zapasu magazynowego,
- wielkość przepływów materiałów (wolumen),
- branża handlowa, produkcyjna lub usługowa,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- stopień przetworzenia obsługiwanych materiałów (odpowiadający kolejnym fazom produkcyjnym, które prowadzą do powstania produktu finalnego oferowanego konsumentowi),
- rodzaj obsługiwanych jednostek ładunku,
- warunki przechowywania dóbr,
- zadania rozdziału i kompletacji (czyli stopień przetworzenia materiałów).

Postać logistyczna obsługiwanych ładunków

Jednym z podstawowych kryteriów technicznych podziału obiektów magazynowych jest postać ładunkowa materiałów jakie są przez nie obsługiwane. To w znacznym stopniu determinuje stosowane w obiekcie technologie składowania i transportu wewnętrznego. Możliwe jest wyróżnienie magazynów obsługujących następujące postaci ładunkowe: paletowe, paletowo-kartonowe, paletowo-kartonowo-sztukowe, kartonowo-sztukowe, sztukowe, kontenerowe – place kontenerowe, kontenerowo-paletowe, sypkie i kawałkowe, dłużycowe i nienormatywne, gazowe, płynne i inne.

Warunki przechowywania determinowane przez obsługiwane ładunki

Wymagane warunki przechowywania determinują stosowane technologie transportowe, technologie magazynowe, konstrukcję i umiejscowienie budynku magazynu, a także organizację pracy. Magazyny można podzielić ze względu na warunki przechowywania na:

- *chłodnie* (składowanie ładunków wymagających temperatur chłodniczych),
- *mroźnie* (składowanie ładunków wymagających temperatur poniżej zera stopni Celsjusza),
- *ogrzewane* (składowanie ładunków wymagających temperatury wyższej niż temperatura otoczenia),
- *klimatyzowane* (składowanie ładunków wymagających określonej temperatury i wilgotności powietrza lub separacji z powietrza związków dla nich szkodliwych, np. warzywa i owoce),
- *do obsługi materiałów niebezpiecznych* (składowanie ładunków wymagających specjalnych warunków przechowywania, składowania i manipulacji ze względu na potencjalne zagrożenie związane z wybuchem, zapłonem lub innym oddziaływaniem chemicznym stwarzającym niebezpieczeństwo dla ludzi i środowiska),
- *umożliwiające spełnienie specjalnych warunków sanitarnych i zapylenia* (składowanie ładunków wymagających określonych warunków sanitarnych, szczególnie żywności i leków, a także warunków niskiego zapylenia związanych z pyłem betonowym (ścieralność posadzki) i kurzem),
- oraz *niewymagające specjalnych warunków przechowywania*.

Układ funkcjonalny magazynu

Układ funkcjonalny obiektu magazynowego określany jest na podstawie rozmieszczenia i ułożenia względem siebie jego obszarów funkcjonalnych. To ono

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

determinuje sposób i kierunek przepływu materiałów przez obiekt. Do podstawowych stref kształtujących układ funkcjonalny magazynu zalicza się strefę przyjęć, składowania, komisjonowania oraz wydań.

Rodzaj zastosowanego w obiekcie układu funkcjonalnego zależy zazwyczaj od pełnionych przez magazyn funkcji, wielkości natężenia przepływu materiałów, dostępności terenu pod zabudowę, układu działki i dostępu do dróg transportu zewnętrznego, oraz innych ograniczeń wynikających z wykorzystywanej infrastruktury. Wobec powyższego możliwe jest wyróżnienie następujących typów układów funkcjonalnych magazynów:

- *przepływowy* (rys. 3.1a) – wejścia i wyjścia materiałowe z magazynu odbywają się z dwóch przeciwległych stron,
- *workowy* – wejście i wyjście materiałów realizowane jest przez rozdzielone (rys. 3.1b) lub nierozdzielone (rys. 3.1d) przestrzennie obszary, ale zlokalizowane na tej samej ścianie (czole) magazynu,
- *kątowy* (rys. 3.1c) – wejście i wyjście materiałów na dwóch przylegających ścianach,
- *cross-docking* (rys. 3.1e) – szczególny przypadek układu przepływowego,
- *jednopoziomowy* – hala magazynowa nie posiada pięter stałych w obrębie swojej powierzchni. Możliwe jest istnienie pięter (kondygnacji) w części niskiej budynku przeznaczonych na cele biurowe lub proste procesy produkcyjne *VAS* itp. Antresola (będąca niezależną od konstrukcji nośnej hali) zazwyczaj nie jest traktowana jako niezależna kondygnacje hali.
- *wielopoziomowy.*

Układ *przepływowy* (zwany również przelotowym) sprzyja ukierunkowaniu przepływów materiałowych i wykorzystywany jest przy dużych i bardzo dużych przepływach. Operacje wejścia i wyjścia nie są mieszane. Strefa rezerw i strefa komisjonowania umieszczone są w środku bryły. Wadą układu jest konieczność zapewnienia dostępu z dwóch stron, a także konieczność ustanowienia oddzielnych obszarów wejścia i wyjścia, co może znacznie zwiększyć wymaganą powierzchnię.

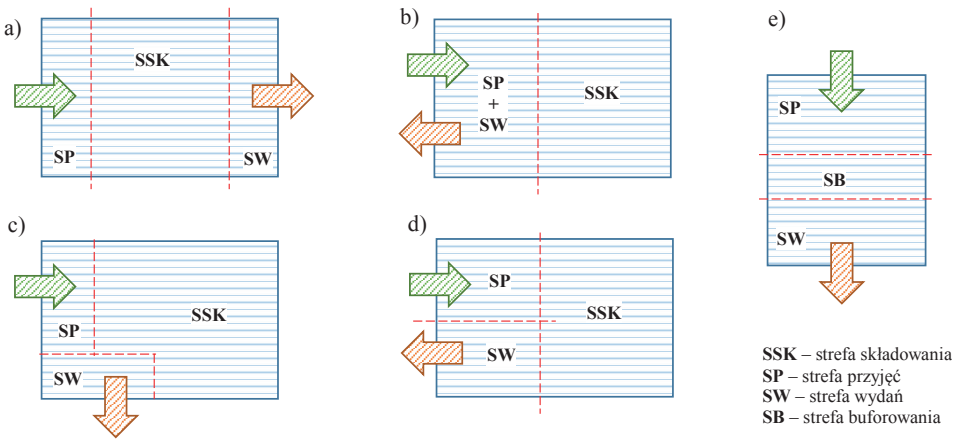
Układ *workowy* pozwala na ograniczenie miejsca potrzebnego na manewrowanie pojazdów i obszary buforowe na wejściu i wyjściu. Stosowany jest do małych i średnich przepływów materiałowych. Jest to najczęściej stosowany układ funkcjonalny magazynu. Jego wadą jest potencjalny konflikt operacji wejścia i wyjścia z magazynu.

Układ *kątowy* umożliwia ukierunkowanie przepływów materiałowych i rozdzielenie operacji wejścia i wyjścia. Strefy przyjęć zlokalizowane są zazwyczaj blisko siebie na sąsiadujących ścianach magazynu. Często układy takie wykorzystywane są do obsługi średnich i dużych przepływów materiałowych, a także konstruowane są w miejscach o ograniczonej przestrzeni (np. zakłady produkcyjne). Układ kątowy może generować problemy w organizacji pracy

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

i wyposażeniu stref funkcjonalnych magazynu, np. problemy związane z ustawieniem konstrukcji regałowych. Podobnie jak układ przepływowy wymaga on również dodatkowej przestrzeni na obszary przyjęcia i wysyłki i obszary manewrowe dla pojazdów.

Układem *cross-docking* charakteryzuje się zazwyczaj określony typ magazynów, a dokładnie magazyny przeładunkowe (cross-dockingowe). Obiekty tego typu najczęściej mają kształt podłużnego prostokąta, przy czym wejścia i wyjścia ulokowane są na dłuższych (przeciwległych) bokach. Ze względu na bardzo dużą rotację materiałów pozbawiony jest praktycznie stref rezerw i stref komisjonowania, które zastąpione zostają obszarami tymczasowego składowania, sortowania i ewentualnie przepakowania. Ze względu na brak konstrukcji regałowych terminal cross-dockingowy przeważnie ma niewielką wysokość (do 5 m).



Rys. 3.1. Warianty układu technologicznego magazynu

Źródło: opracowanie własne.

Forma zabudowy przestrzeni składowania

Kolejnym z kryteriów klasyfikacji obiektów magazynowych jest forma zabudowy zastosowanej w nich przestrzeni składowania. Pozwala ono na klasyfikację i wyróżnienie takich magazynów, jak:

- *place składowe* – otwarta, płaska przestrzeń przeznaczona do składowania określonych rodzajów materiałów, przeważnie niewrażliwych na warunki atmosferyczne;
- *wiaty* – półotwarte obiekty do składowania materiałów wyposażone w dach, jednak pozbawione ścian. Przeznaczone są do składowania materiałów wrażliwych na deszcz i śnieg, ale niewrażliwych na temperaturę lub wymagających przewiewu;

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- *piwnice* i *bunkry* – miejsca składowania ulokowane pod powierzchnią gruntu (najniższe kondygnacje budynków) lub o szczególnej konstrukcji przeznaczone do przechowywania materiałów niebezpiecznych (szczególnie wybuchowych);
- *zbiorniki cieczy, gazów i materiałów sypkich*;
- *silosy* – szczególny rodzaj zbiorników do przechowywania materiałów sypkich i pylistych;
- *hale przemysłowe* – budynki o zastosowaniu ogólnym o konstrukcji nośnej stalowej lub betonowej, o względnie lekkich ścianach i dachu oraz posadzce betonowej o określonych parametrach wytrzymałościowych. Słupy konstrukcji nośnej umieszczone są w obrębie budynku;
- *hale oparte na konstrukcji regałów – magazyny wysokoregałowe* – budynki przeznaczone wyłącznie do zastosowań magazynowych, których konstrukcję nośną stanowi system regałów magazynowych (najczęściej paletowych). Nie posiadają klasycznych słupów nośnych. Poszycie ścian i dachu opiera się bezpośrednio na konstrukcji regałów, najczęściej stalowej.

Stopień automatyzacji procesu magazynowego

Stopień mechanizacji czynności magazynowych wynika głównie z wielkości, intensywności i częstości przepływu materiałów przez obiekt magazynowy. Istotna w tym przypadku jest również podatność obsługiwanych materiałów na automatyzację, a także wartość dóbr i koszty pracy ręcznej (ludzkiej) w stosunku do automatycznej. Wobec tego ze względu na stopień mechanizacji możliwe jest wyróżnienie takich magazynów, jak:

- *niezmechanizowane* – wszystkie operacje magazynowe wykonywane są przez ludzi przy użyciu wyłącznie prostych urządzeń;
- *częściowo zmechanizowane* – tylko wybrane fragmenty procesu magazynowego są obsługiwane przez pracowników wykorzystujących urządzenia mechaniczne, w tym wózki i przenośniki;
- *zmechanizowane* – znaczna większość zadań magazynowych wykonywana jest przez pracowników za pomocą urządzeń mechanicznych, takich jak wózki widłowe, dźwignice, przenośniki, przy czym sterowanie urządzeniami, kontrola i nadzór w pełni realizowane są przez człowieka;
- *częściowo automatyczne* – rozwiązania automatyczne są wykorzystywane w wybranych fragmentach procesu magazynowego (szczególnie w zakresie obsługi stref rezerw), jednakże część prac wykonywana jest środkami mechanicznymi i ręcznie;
- *automatyczne* – znaczna większość zadań procesu magazynowego jest realizowana przez urządzenia automatyczne, takie jak układnice magazynowe, AS/SR, automaty kompletujące, autonomiczne wózki AGV czy sortery. Praca automatyczna jest kontrolowana przez system informatyczny i jedynie nadzorowana przez operatora systemu. Czynności mechaniczne i ręczne są ograniczone do minimum.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

3.2. PODSTAWOWE ELEMENTY PROCESU MAGAZYNOWEGO

W zależności od rodzaju obiektu magazynowego, jego wyposażenia, ukształtowania, a także wynikających z tego funkcji i zadań, w procesie magazynowym realizowanym w ramach obiektu mogą występować różne rodzaje podprocesów i czynności. Niemniej jednak jedno z uniwersalnych podejść traktuje proces magazynowy rozumiany jako zespół działań związanych z przyjmowaniem, składowaniem, kompletacją i wydawaniem dóbr materialnych, w odpowiednio przystosowanych do tego miejscach i przy spełnieniu określonych warunków organizacyjnych i technologicznych. Wobec tego można uznać, że w skład procesu magazynowego wchodzą takie podprocesy, jak: przyjęcie, składowanie, kompletacja i wydanie. Należy jednak pamiętać, iż jest to bardzo ogólne podejście, a proces magazynowy może mieć wiele różnych postaci oraz zawierać wiele składowych podprocesów. Wybór i odpowiednie powiązanie elementów procesu (podprocesów) zdeterminowane jest przez funkcje i zadania jakie pełni obiekt magazynowy.

Jak wspomniano w rozdziale 1.1, proces magazynowy może być również definiowany jako ciąg przekształceń strumieni materiałów i informacji ze względu na czas, miejsce i postać zachodzących w obszarze obiektu magazynowego. Wobec tego w wyniku poszczególnych składowych procesu magazynowego dochodzi do transformacji określonych parametrów i charakterystyk ładunków, co przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Wybrane składowe procesu magazynowego w odniesieniu do transformowanego elementu (jm – jednostka magazynowa)

OPERACJA	TRANSFORMACJA
I. PRZYJĘCIE	
a) Rozładunek	miejsca
b) Identyfikacja i kontrola	czasu
c) Buforowanie na wejściu	czasu
II. WPROWADZENIE	
a) Przewóz do strefy składowania	miejsca
b) Umieszczenie jm w lokacji strefy składowania	miejsca
III. SKŁADOWANIE	
a) Przechowywanie materiału	czasu
IV. UZUPEŁNIANIE STREFY KOMISJONOWANIA	
a) Przewóz do strefy komisjonowania	miejsca
b) Przekształcenie jm do postaci oferowanej podczas kompletacji	postaci
c) Uzupełnianie jm miejsc oferowania	miejsca
d) Wprowadzenie do składowania pozostałych jm	miejsca
e) Odwóz w wyznaczone miejsce pustych opakowań i nośników ładunków	miejsca

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 3.1. cd.

OPERACJA	TRANSFORMACJA
V. KOMISJONOWANIE	
a) Uzupełnienie miejsc oferowania	miejsca
b) Przygotowanie artykułów do pobrania podczas kompletacji	postaci
c) Pobieranie artykułów podczas kompletacji	miejsca
d) Sortowanie, pakowanie, przygotowanie do transportu jm	postaci
e) Przewóz gotowych jm do wyznaczonego miejsca w strefie kompletacji	miejsca
f) Przewóz gotowych jm do bufora wyjściowego	miejsca
VI. KONFEKCJONOWANIE (CO-PACKING)	
a) Dowóz jm do stanowisk konfekcjonowania (copackingu)	miejsca
b) Przygotowanie artykułów do procesu konfekcjonowania (co-packingu)	postaci
c) Tworzenie nowych jednostek SKU (np. zestawów promocyjnych – łączenie SKU)	postaci
d) Pakowanie, etykietowanie, metkowanie, foliowanie jm	postaci
e) Przewóz gotowych jm do wyznaczonego bufora	miejsca
f) Łączenie, rozdział strumieni materiałów, sortowanie	postaci (ilości/liczby)
VII. WYSYŁKA	
a) Buforowanie na wyjściu	czasu
b) Identyfikacja i kontrola	czasu
c) Załadunek	miejsca
VIII. OBSŁUGA ZWROTÓW / UTYLIZACJA	
a) Identyfikacja i kontrola	czasu
b) Buforowanie zwrotów materiałowych i opakowań	czasu
c) Załadunek środków transportu zewnętrznego	miejsca
IX. CROSS-DOCKING	
a) Przewóz z bufora wejściowego do wyjściowego	miejsca

Źródło: opracowanie własne na podstawie [145].

3.3. CHARAKTERYSTYKA ELEMENTÓW PROCESU MAGAZYNOWEGO

Kolejne czynności wykonywane w ramach procesu magazynowego mogą być również traktowane jako elementy składowe procesu, podprocesy lub samodzielne procesy. Każdy z nich charakteryzuje się określonym celem działań. Podstawowe składowe procesu magazynowego, do których zaliczyć można

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

m.in.: przyjęcie materiałów, wprowadzenie do składowania, składowania, uzupełnianie, kompletację, wyprowadzenie i wysyłkę, a także *co-packing* czy *cross-docking* scharakteryzowano krótko w dalszej części niniejszego rozdziału na podstawie [145].

Przyjęcie materiałów

Przyjęcie materiałów jest pierwszym zestawem operacji jakie wykonywane są na materiałach dostarczanych do obiektu magazynowego. Przyjęcie materiałów może być dwojakiego rodzaju: zewnętrzne i wewnętrzne. Przyjęcie zewnętrzne to takie, w którym materiały wprowadzane do magazynu pochodzą od zewnętrznego dostawcy (niezależnego prawnie pomiotu gospodarczego/przedsiębiorstwa). W przypadku przyjęcia wewnętrznego materiały dostarczane są do obiektu od dostawcy wewnętrznego, czyli takiego, który podlega temu samemu przedsiębiorstwu co obiekt magazynowy. Dostawca wewnętrzny może być jedynie wydzielonym obszarem obiektu magazynowego lub obiektem logistycznym zlokalizowanym w jego sąsiedztwie, albo niezależnym, oddalonym obiektem. W pierwszym przypadku dostawy odbywają się środkami transportu wewnętrznego, w drugim natomiast środkami transportu zewnętrznego. Do podstawowych elementów przyjęcia materiałów zalicza się: rozładunek, identyfikację, kontrolę i buforowanie.

Rozładunek sprowadza się do podjęcia materiału w środku transportu zewnętrznego, przewiezieniu go do magazynu i odłożeniu w przygotowanej do tego przestrzeni. Technologia rozładunku zależna jest od postaci logistycznej materiałów i ich właściwości fizycznych (wymiary, masa, podatność na uszkodzenia), rodzaju i parametrów środków transportu zewnętrznego oraz dostępnej infrastruktury przeładunkowej obiektu magazynowego (frontu ładunkowego).

Identyfikacja ładunku na wejściu do obiektu wiąże się z jednoznacznym określeniem nazwy tego materiału, jego ilości, producenta, daty ważności, numeru serii produkcji i dodatkowych informacji dotyczących wymogów jego obsługi logistycznej (np. materiał wrażliwy na uderzenia i wstrząsy, materiał niebezpieczny, materiał łatwo psujący się). Współcześnie procesy identyfikacji materiałów są automatyzowane i sprowadzają się do odczytu jego etykiety logistycznej (zeskanowaniu kodu kreskowego na etykiecie), odczytu tagu RFID itp.

Kontrolowanie materiałów przyjmowanych do magazynu może dotyczyć kontroli ilościowej, jakościowej lub obu równocześnie. Kontrola ilościowa jest sprawdzeniem zgodności ilościowej ładunku z zamówieniem lub dokumentami towarzyszącymi dostawie (list przewozowy, specyfikacja ładunkowa). W jej trakcie pracownicy przeliczają opakowania, jednostki ładunkowe znajdujące się w dostawie lub ważą i mierzą dostarczone materiały. Podczas kontroli jakościowej oceniania jest jakość materiałów. Zazwyczaj sprowadza się to do wzrokowego sprawdzenia czy ładunek nie jest uszkodzony (pogniecione, podarte opakowania, ślady zalania itp.) i czy jest odpowiednio zabezpieczony (np. foliowanie

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

jednostki ładunkowej jest kompletne i nieuszkodzone). W przypadku obiektów magazynowych, obsługujących np. surowce produkcyjne, artykuły spożywcze, podczas kontroli jakościowej mogą być dodatkowo pobierane próbki do badań (np. laboratoryjnych). Do momentu uzyskania pozytywnych wyników badań materiały nie mogą zostać przyjęte do magazynu.

Buforowanie na wejściu do obiektu magazynowego to proces dotyczący oczekiwania przyjętych materiałów na dalszą obsługę logistyczną. Materiały te są tymczasowo składowane w specjalnie przygotowanym do tego obszarze. W niektórych przypadkach w trakcie buforowania materiały mogą być również kontrolowane i przekształcane (czynności zachodzące równolegle z czynnościami fazy buforowania) do postaci wymaganej podczas składowania, tj. dostosowanie wysokości jednostek ładunkowych, utworzenie od podstaw nowych jednostek ładunkowych, przepakowanie materiałów do innych nośników (np. z palety do pojemników, kuwet), zabezpieczenie jednostek ładunkowych.

Wprowadzenie materiałów do składowania

Wprowadzenie materiałów do składowania to etap procesu magazynowego, w którym przyjęte do magazynu jednostki materiałowe przewożone są do miejsc składowania w ściśle określonej strefie (strefie składowania). Jednym z podprocesów tego etapu może być odpowiednie przygotowanie jednostek do składowania (przeformowanie, przepakowania, etykietowanie, zabezpieczenie), o ile czynności te nie zostały wykonane już podczas przyjęcia w strefie wejścia do obiektu magazynowego. Wprowadzenie materiałów może również być traktowane jako składowa ich przyjęcia. Taka sytuacja ma miejsce, jeżeli proces wprowadzenia realizowany jest przez pracowników wykonujących przyjęcie materiałów. W przypadku gdy robią to pracownicy i urządzenia pracujące w strefie składowania, proces wprowadzenia traktowany jest jako niezależny od przyjęcia etap procesu magazynowego.

Proces wprowadzenia materiałów do strefy składowania jest związany z odpowiednim przydziałem ładunków do lokacji w tej strefie. Odbywa się on na podstawie ściśle kreślonych zasad, metod i algorytmów. Najczęściej stosowanymi metodami rozmieszczenia asortymentu w strefie są: metoda losowa, metoda pierwszej wolnej lokacji, metody klasowe (ABC, XYZ, ABC/ZYX, grupowania rodzinnego itp.), metody stałych miejsc (dedykowanych miejsc, np. COI, volume based).

Składowanie

Składowanie zazwyczaj stanowi zasadniczą i podstawową część procesu magazynowego, podczas której strumienie materiałów przekształcane są ze względu na czas. Oznacza to, iż po odłożeniu do lokacji w strefie składowania, spędzają one tam określony okres czasu, którego długość zależy od tego kiedy pojawi się zapotrzebowanie na daną pozycję asortymentową. Średnia długość czasu jaką spędza dany rodzaj asortymentu w składowaniu nazywa się normatywem jego zapasu.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Uzupełnianie miejsc oferowania w strefie komisjonowania

Uzupełnianie miejsc oferowania w strefie komisjonowania to etap procesu magazynowego odpowiadający za to, aby w strefie komisjonowania znajdowała się odpowiednia liczba pozycji asortymentu danego rodzaju (odpowiednia – to znaczy taka, która w danym okresie umożliwi realizację w tej strefie procesów kompletacji zamówień napływających od klientów). Uzupełnianie miejsc oferowania może odbywać się wg dwóch podstawowych scenariuszy.

- W pierwszym z nich strefa komisjonowania zasilana jest jednostkami materiałów pobranymi ze strefy składowania.
- W drugim przypadku materiały, którymi uzupełnianie są miejsca oferowania, pobierane są ze strefy buforowej na wejściu do obiektu. Taka sytuacja może mieć miejsce, gdy w strefie komisjonowania wystąpi zapotrzebowanie na dany rodzaj materiału, a równocześnie jednostka tego samego rodzaju materiału oczekuje na wprowadzenie do strefy składowania. Wówczas w celu ograniczenia liczby dodatkowych czynności jednostka oczekująca na wprowadzenia pobierana jest do uzupełniania strefy komisjonowania. Nie ma potrzeby wprowadzania jej do strefy składowania, a ze strefy składowania pobierania jednostek do uzupełniania.

W zależności od przyjętej strategii i technologii kompletacji strefa komisjonowania może być uzupełniana jednostkami paletowymi, opakowaniami zbiorczymi lub opakowaniami jednostkowymi. Wobec tego w procesie uzupełniania mogą wystąpić dodatkowe czynności związane z rozformowaniem większych jednostek do postaci mniejszych, którymi uzupełniane są miejsca oferowania asortymentu.

Kompletacja i komisjonowanie

Kompletacja jest kluczowym i bardzo często najważniejszym etapem procesu magazynowego (ze względu na czasochłonność, pracochłonność i kosztowność procesu). Jej zadaniem jest realizacja zapotrzebowań klientów na niejednorodne asortymentowo jednostki ładunkowe. Oznacza to, że podczas kompletacji realizowane są czynności związane z wybieraniem z określonych miejsc składowania lub przygotowania (w strefie kompletacji) odpowiedniej liczby artykułów oraz zestawiania ich w odrębną, wydzieloną całość, która następnie zostanie przekazana do strefy wydań magazynu celem wysłania do odbiorcy. Kompletacja jest procesem podrzędnym w stosunku do komisjonowania, będąc równocześnie jego składową. W ramach komisjonowania, oprócz typowych czynności kompletacyjnych (związanych z formowaniem niejednorodnych jednostek ładunkowych wg zamówień klientów) realizowane są także czynności związane z przygotowaniem i organizacją systemu komisjonowania, umożliwiając mu tym samym osiągnięcie wyznaczonego celu (np. przetwarzanie zamówień klientów, generowanie oraz grupowanie i odpowiedni rozdział list kompletacyjnych (w przypadku określonych strategii kompletacji), klasyfikacja asortymentu i usystematyzowanie miejsc oferowania, a także rozmieszczenie asortymentu w strefie kompletacji, wybór

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

sposobu uzupełniania braków asortymentowych w miejscach oferowania, opracowywanie tras pracowników kompletacyjnych).

Procesy kompletacji i komisjonowania są procesami złożonymi i istnieje wiele metod, strategii, sposobów ich realizacji, a także możliwe jest wykorzystanie na ich potrzeby wielu nowoczesnych technologii. Procesy te mogą być realizowane np. wg strategii człowiek do asortymentu lub asortyment do człowieka, wg pojedynczego zlecenia lub grupy zleceń, równocześnie bądź sekwencyjnie, i wiele innych. Więcej informacji nt. sposobów i technologii kompletowania przedstawionych zostanie w kolejnych rozdziałach.

W ramach procesów kompletacji i komisjonowania mogą być wykonywane dodatkowo czynności związane z etykietowaniem jednostek niejednorodnych asortymentowo, sortowaniem, zabezpieczaniem, foliowaniem i transportem gotowych jednostek w wyznaczone miejsca. Kompletacja zamówień klientów może zatem być realizowana według wielu różnych wariantów i strategii.

Wyprowadzenie

Wyprowadzenie to szereg czynności związanych z pobraniem jednostek materiałowych ze strefy/obszaru ich składowania i przewiezieniem ich w odpowiednie miejsce, gdzie będą przygotowywane do wysyłki. W większości przypadków proces wyprowadzenia rozpoczyna się w strefie składowania i kończy w strefie buforowej na wyjściu z obiektu magazynowego. Może jednak wystąpić potrzeba poddania wysyłanych jednostek dodatkowym procesom. Procesy te mają za zadanie dodanie określonych wartości, cech do wysyłanego strumienia materiałów. Wówczas proces wyprowadzenia jednostek materiałowych ze strefy składowania może obejmować dodatkowo dostarczenie tych jednostek do obszarów, w których realizowane będą procesy np. konfekcjonowania, konsolidacji, dekonsolidacji, sortowania.

Konfekcjonowanie (co-packing)

Konfekcjonowanie to etap procesu magazynowego, który polega na konstruowaniu nowych pozycji asortymentowych lub odpowiednim uzupełnianiu i dodawaniu określonych właściwości pozycjom już istniejącym. Przykładem konfekcjonowania może być konstruowanie opakowań promocyjnych (tworzenie nowej pozycji asortymentowej z pozycji już istniejących, np. połączenie dwóch batonów w jeden zestaw promocyjny), konstruowanie nowej postaci asortymentowej (np. pojedyncze sztuki asortymentu łączone są w opakowania zbiorcze i od tej pory jest to najmniejsze niepodzielne opakowanie dla tego typu produktu – postać sprzedażowa), uzupełnianie opakowań z produktem o dodatkową dokumentację (dokładanie do kartonów ze sprzętem RTV instrukcji użytkownika, pilota, baterii, karty gwarancyjnej itp.).

Wysyłka materiałów (wydanie materiałów)

Wysyłka (wydanie) materiałów jest ostatnim zestawem działań i operacji jakie wykonywane są na materiałach obsługiwanych w obiekcie magazynowym.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wydanie materiałów (podobnie jak przyjęcie) może być zewnętrzne lub wewnętrzne. Wydanie zewnętrzne to takie, w którym materiały wysyłane są do zewnętrznego odbiorcy (niezależnego prawnie pomiotu gospodarczego /przedsiębiorstwa). W przypadku wydania wewnętrznego materiały wysyłane są z obiektu do odbiorcy wewnętrznego, czyli takiego, który podlega temu samemu przedsiębiorstwu co obiekt magazynowy. W zależności od rodzaju odbiorcy i odległości w jakiej jest on zlokalizowany w stosunku do obiektu magazynowego wysyłki odbywają się środkami transportu wewnętrznego lub środkami transportu zewnętrznego. Do podstawowych elementów wysyłki materiałów zalicza się: buforowanie jednostek, ich identyfikację i kontrolę oraz załadunek środków transportu zewnętrznego (alternatywnie przewóz jednostek środkami transportu wewnętrznego do odbiorcy wewnętrznego).

Cross-docking

Cross-docking jest specyficznym etapem procesu magazynowego, występującym zazwyczaj w magazynach przeładunkowych. Proces ten polega na względnie szybkim (w okresie nieprzekraczającym zazwyczaj 24 godzin) przewiezieniu materiałów przyjętych do magazynu do strefy wydań i wysyłce ich do klienta. W procesie dodatkowo materiały mogą być rozdzielane, sortowane i w razie potrzeby przeformowywane. Pomijane są procesy składowania i rozbudowanej kompletacji.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

4 PROBLEMATYKA WYDAJNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA W OBIEKTACH MAGAZYNOWYCH

4.1. EFEKTYWNOŚĆ I WYDAJNOŚĆ PROCESU I OBIEKTU MAGAZYNOWEGO

Na potrzeby oceny obiektów i procesów magazynowych bardzo często wykorzystywane są miary odnoszące się do ich efektywności lub wydajności.

Istnieje wiele różnych sposobów definiowania efektywności, które uzależnione są od celu jej określania. W naukach ekonomicznych efektywność ekonomiczna określana jest jako jednoczesne osiąganie efektywności technologicznej oraz efektywności alokacyjnej, przy czym efektywność technologiczna obejmuje dobór technologii do zadań, a efektywność alokacyjna dotyczy przydziału zasobów do zadań [184], [266]. Oba te pojęcia należy rozpatrywać jednocześnie. Ponieważ podstawą istnienia obiektów magazynowych są cele ekonomiczne, także i do nich mogą być stosowane te zasady. W pracy [226] wyróżniono trzy podstawowe podejścia do opisu efektywności:

- celowościowe – ocena efektywności dotyczy przede wszystkim stopnia realizacji celu, a w następnej kolejności stopnia wykorzystania zasobów,
- systemowe – efektywność to umiejętność pokonywania przez organizację trudności związanych z niepewnością płynącą z otoczenia lub kształtowania przez nią otoczenia w kierunku dogodnym dla tej organizacji,
- wielokryterialne – efektywność jako realizacja systemu celów i utrzymywanie założonych standardów pracy.

W przypadku obiektów magazynowych każde z wymienionych powyżej podejść powinno być uwzględniane w ocenie jego efektywności. Niemniej jednak najczęściej efektywność odnoszona jest do celu działania magazynu, w wyniku czego uwzględnia ona [184]:

- stopień realizacji przez magazyn jego zadania logistycznego (celem zasadniczym jest obsłużenie wszystkich przepływów materiałowych i informacyjnych terminowo oraz przy założonym poziomie jakościowym),
- cel ekonomiczny, tj. zysk związany z funkcjonowaniem danego przedsiębiorstwa czy też organizacji, którego częścią jest magazyn (celem zasadniczym jest maksymalizacja zysku, poprzez minimalizację kosztów pracy oraz kosztów eksploatacyjnych).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Takie podejście umożliwia zdefiniowanie efektywności funkcjonowania w okresie t obiektu magazynowego jako iloraz użytecznych efektów $F(t)$ oraz bezpośrednio poniesionych w tym okresie nakładów $N(t)$, tj.:

$$EM(t) = \frac{F(t)}{N(t)} \tag{4.1}$$

gdzie: $F(t)$ – wartości uzyskanych efektów do chwili t dla obiektu magazynowego od początku jego funkcjonowania lub od rozpoczęcia okresu badań, $N(t)$ – wartość poniesionych nakładów do chwili t dla obiektu magazynowego od początku jego funkcjonowania lub od rozpoczęcia okresu badań.

Traktowanie efektywności jako relacji nakładów i efektów pozwala na określanie jej również jako [184], [295], [310]:
- różnicę między efektami a nakładami (*Present Value, PV* lub *Net Present Value*, *NPV*) – wynik powinien być większy od zera (efekty są większe od poniesionych nakładów).
- iloraz efektów do poniesionych nakładów (*Benefit-Cost Ratio*, *B/C Ratio*) – wynik powinien być większy od jedności (nakłady są niższe od uzyskanych efektów),
- wyrażany procentowo iloraz różnicy między efektami a nakładami do poniesionych nakładów (*Return on Investment, ROI*).

Pojęciem pokrewnym w stosunku do efektywności jest wydajność, która jest relacją między wyjściem, gdzie efektem jest powstanie określonych rzeczy lub usług, a zasobami użytymi do wytworzenia tych rzeczy [241]. Co więcej, wydajność bardzo często postrzegana jest jako miara efektywności odnosząca wielkość produkcji do wielkości zasobów użytych do jej wytworzenia, dlatego wydajność może być określana za pomocą stosunku produkcji do nakładów [25], tj.:

$$WM(t) = \frac{O(t)}{N(t)} \tag{4.2}$$

gdzie: $O(t)$ – ilość dóbr lub usług wyprodukowanych lub zrealizowanych do chwili t przez obiekt magazynowy od początku jego funkcjonowania lub od rozpoczęcia okresu badań, $N(t)$ – wartość poniesionych nakładów do chwili t dla obiektu magazynowego od początku jego funkcjonowania lub od rozpoczęcia okresu badań.

Można wobec tego przyjąć, iż wydajność odnosi się do zakresu w jakim czas, wysiłek lub koszt jest wykorzystany do wykonania zaplanowanego działania na potrzeby osiągnięcia założonego celu. Cel ten powinien zostać osiągnięty przy założonym poziomie efektywności, tj. z minimalnym poziomem odpadów, wydatków lub zbędnego wysiłku. Wydajność jest zatem koncepcją wymierną, ilościową, determinowaną stosunkiem wyjścia do wejścia [241]. Takie podejście do wydajności zaprezentowano w pracy [240], gdzie zdefiniowano ją jako stosunek pomierzonych wyników (np. liczba sztuk, jednostek ładunkowych) i nakładów

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

(liczba roboczogodzin potrzebnych do ich produkcji lub obsłużenia). Wobec tego, dla rozróżnienia pojęć efektywność będzie rozumiana jako relacja tych wyników do standardów lub oczekiwań, np. jako miara będzie to miesięczna produkcja ukazana jako procent ustalonego celu na dany miesiąc [241].

Reasumując, zgodnie z przedstawionym powyżej podejściem wydajność może być rozumiana jako miara wskazująca, jak dobrze organizacja (obiekt magazynowy) wykorzystuje swoje zasoby do produkcji produktów lub realizacji usług, a efektywność określi w jakim stopniu organizacja (obiekt magazynowy) osiąga założone cele.

4.2. MIARY EFEKTYWNOŚCI I WYDAJNOŚCI PROCESU I OBIEKTU MAGAZYNOWEGO

W niniejszym rozdziale przedstawiono miary efektywności i wydajności, które najczęściej wykorzystywane są do oceny procesu i obiektu magazynowego. Należą do nich:

- *wydajność pracy obiektu*, tj. całkowita liczba jednostek ładunkowych obsłużonych przez obiekt magazynowy w ciągu określonego przedziału czasu:

$$WPM = \frac{\lambda}{RG} \tag{4.3}$$

gdzie:

λ – liczba jednostek ładunkowych obsłużonych przez obiekt magazynowy na wejściu i wyjściu w ciągu określonego przedziału czasu, np. sztuk/miesiąc,

RG – sumaryczna liczba roboczogodzin poświęconych podczas pracy magazynu na obsługę jednostek na wejściu i wyjściu z obiektu w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc;

- *efektywność pracy obiektu*, tj. całkowita liczba jednostek ładunkowych obsłużonych przez obiekt magazynowy w ciągu określonego przedziału czasu:

$$EPM = \frac{RG^{TEO}}{RG} \tag{4.4}$$

gdzie:

RG^{TEO} – teoretyczna liczba roboczogodzin jaka powinna zostać poświęcona na obsługę jednostek na wejściu i wyjściu z obiektu w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc,

RG – sumaryczna liczba roboczogodzin poświęconych podczas pracy magazynu na obsługę jednostek na wejściu i wyjściu z obiektu w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– *wydajność podukładu przeładunkowego na wejściu*, tj. liczba jednostek ładunkowych obsłużonych na wejściu do obiektu magazynowego w ciągu godziny pracy:

$$WPWE = \frac{\lambda^{WE}}{RG^{WE}} \tag{4.5}$$

gdzie:

λ^{WE} – liczba jednostek ładunkowych obsłużonych przez obiekt magazynowy na wejściu w ciągu określonego przedziału czasu, np. sztuk/miesiąc,

RG^{WE} – sumaryczna liczba roboczogodzin poświęconych na obsługę jednostek na wejściu do obiektu w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc;

– *wydajność podukładu składowania*, tj. liczba jednostek ładunkowych obsłużonych przez strefę składowania obiektu magazynowego w ciągu godziny pracy:

$$WPS = \frac{ZAP}{RG^{SK}} \tag{4.6}$$

gdzie:

ZAP – liczba jednostek ładunkowych składowanych w obiekcie magazynowym w ciągu określonego przedziału czasu (średni zapas), np. sztuk/ /miesiąc,

RG^{SK} – sumaryczna liczba roboczogodzin poświęconych na obsługę strefy składowania obiektu w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc;

– *wydajność podukładu uzupełniania*, tj. liczba jednostek ładunkowych dostarczonych do strefy kompletacji obiektu magazynowego w ciągu godziny pracy w ramach procesu uzupełniania miejsc oferowania asortymentu:

$$WPU = \frac{\lambda^{U}}{RG^{U}} \tag{4.7}$$

gdzie:

λ^{U} – liczba jednostek ładunkowych, którymi uzupełniona została strefa kompletacji obiektu magazynowego w ciągu określonego przedziału czasu, np. sztuk/miesiąc,

RG^{U} – liczba roboczogodzin poświęconych na uzupełnianie strefy kompletacji obiektu w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc;

– *wydajność podukładu kompletacji*, tj. liczba linii zamówień pobranych w ciągu godziny pracy w ramach procesu kompletacji:

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

$$WPK = \frac{LZ^K}{RG^K} \tag{4.8}$$

gdzie:

LZ^K – liczba linii zamówień klientów, zrealizowanych podczas kompletacji w ciągu określonego przedziału czasu, np. linii/miesiąc,

RG^K – całkowita liczba roboczogodzin poświęconych na kompletację w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc;

– *wydajność podukładu wysyłek*, tj. liczba linii zamówień wysłanych do klientów w ciągu godziny pracy:

$$WPW = \frac{LZ^W}{RG^W} \tag{4.9}$$

gdzie:

LZ^W – liczba linii zamówień klientów, wysłanych do klientów w ciągu określonego przedziału czasu, np. linii/miesiąc,

RG^W – całkowita liczba roboczogodzin poświęconych na wysyłkę zamówień do klientów w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/ /miesiąc;

– *wydajność podukładu przeładunkowego na wyjściu*, tj. liczba jednostek ładunkowych obsłużonych na wyjściu z obiektu magazynowego w ciągu godziny pracy:

$$WPWY = \frac{\lambda^{WY}}{RG^{WY}} \tag{4.10}$$

gdzie:

λ^{WY} – liczba jednostek ładunkowych obsłużonych przez obiekt magazynowy na wyjściu w ciągu określonego przedziału czasu, np. sztuk/miesiąc,

RG^{WY} – liczba roboczogodzin poświęconych na obsługę jednostek na wejściu do obiektu w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/ /miesiąc;

– *efektywność wykorzystania przestrzeni składowania*, tj. stopień wykorzystania dostępnej przestrzeni składowania magazynu na składowanie materiałów:

$$EKUB = \frac{KUB^{WYK}}{KUB^{DOS}} \tag{4.11}$$

gdzie:

KUB^{WYK} – kubatura przestrzeni magazynowej wykorzystana przez składowane materiały (m^3),

KUB^{DOS} – całkowita kubatura przestrzeni magazynowej przeznaczona na składowanie materiałów (m^3);

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– *rotacja – obrót materiałowy*, tj. wskaźnik obrotu materiałowego wyrażony wielkością sprzedaży i wartością utrzymywanego zapasu:

$$EROT = \frac{SPR}{WZ} \tag{4.12}$$

$$WZ = \sum_{ra \in RA} ZAP(ra) \cdot c(ra) \tag{4.13}$$

$$SPR = \sum_{ra \in RA} SPRS(ra) \cdot c(ra) \tag{4.14}$$

gdzie:

SPR – wartość sprzedaży materiałów składowanych w magazynie w określonym przedziale czasu (np. zł/miesiąc),
SPRS(*ra*) – liczba jednostek ładunkowych materiałów *ra*-tego rodzaju sprzedanych w określonym przedziale czasu (np. sztuk/miesiąc),
WZ – wartość finansowa zapasu materiałów utrzymywanego w magazynie w określonym przedziale czasu (np. zł/miesiąc),
ZAP(*ra*) – liczba jednostek ładunkowych materiałów *ra*-tego rodzaju składowanych w magazynie w określonym przedziale czasu (np. sztuk/miesiąc),
c(*ra*) – wartość finansowa jednej jednostki ładunkowej *ra*-tego rodzaju w określonym przedziale czasu (np. zł);

– *stopień zapełnienia magazynu*, tj. stopień wykorzystania dostępnych miejsc składowania magazynu do składowania materiałów:

$$EPOJ = \frac{POJ^{WYK}}{POJ^{DOS}} \tag{4.15}$$

gdzie:

POJ^{WYK} – liczba miejsc składowania zapełniona przez materiały w określonym przedziale czasu (sztuk),
POJ^{DOS} – całkowita liczba miejsc w magazynie przeznaczonych do składowania materiałów w określonym przedziale czasu (sztuk);

– *stopień wykorzystania wyposażenia magazynu*, tj. stopień wykorzystania dostępnych w obiekcie magazynowym środków transportu:

$$ESTR = \frac{RG^{STW}}{RG} \tag{4.16}$$

gdzie:

RG^{STW} – sumaryczna liczba roboczogodzin pracy wszystkich środków transportu wewnętrznego w magazynie w ciągu określonego przedziału czasu, np. roboczogodzin/miesiąc,
RG – sumaryczna liczba roboczogodzin pracy magazynu, w ciągu określonego przedziału czasu, w których środki transportu były gotowe do pracy, np. roboczogodzin/miesiąc.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

4.3. WYBRANE PODEJŚCIA DO ZWIĘKSZANIA WYDAJNOŚCI PROCESU MAGAZYNOWEGO

4.3.1. DOBÓR TECHNOLOGII SKŁADOWANIA I TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

Jednym z zasadniczych sposobów osiągnięcia wymaganej efektywności i wydajności obiektu i procesu magazynowego (lub też jej zwiększenia w przypadku obiektów istniejących) jest odpowiednie ukształtowanie jego podstawowych obszarów funkcjonalnych, tj. stref składowania materiałów oraz transportu wewnętrznego. Poprawny dobór technologii magazynowania i transportu wewnętrznego może prowadzić do znacznego przyśpieszenia procesów wprowadzenia, wyprowadzenia materiałów, a także kompletacji, konfekcjonowania, inwentaryzacji, itp. Skrócenie czasu realizacji podstawowych zadań magazynowych bezpośrednio wpływa na poprawę efektywności i wydajności obiektów magazynowych.

Dobór technologii składowania

Dobór odpowiedniego sposobu składowania i oferowania materiałów, a także niezbędnego do jego realizacji wyposażenia jest ściśle związany zarówno z procesem magazynowym, jak i obiektem, w którym te procesy są realizowane. Przy wyborze technologii należy kierować się wieloma kryteriami, do których należą m.in. [114]:

- kryteria techniczne:
  - kryterium powierzchni obiektu magazynowego (np. w przypadku dostępności tylko małej powierzchni działki pod zabudowę lub dużego kosztu zakupu m^2 działki),
  - kryterium kubatury obiektu magazynowego (np. w przypadku ograniczeń związanych z koniecznością niskiej zabudowy),
  - kryterium pojemności stref funkcjonalnych (gdy wymagane jest pomieszczenie jak największej liczby jednostek ładunkowych w ograniczonej obszarowo strefie, np. w obszarach chłodni i mroźni),
  - kryterium wydajności i efektywności procesu (kładące nacisk na maksymalizację wydajności i efektywności procesów realizowanych wg określonej technologii – procesów składowania, kompletacji, transportu wewnętrznego itp.),
  - kryterium poziomu automatyzacji procesów;
- kryteria ekonomiczne:
  - kryterium nakładów inwestycyjnych na technologię,
  - kryterium kosztów operacyjnych i eksploatacyjnych (generowanych w wyniku zastosowania danej technologii do realizacji procesów składowania, kompletacji, transportu wewnętrznego itp.);

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- kryteria dodatkowe:
  - kryterium selektywności asortymentu (określające czy w każdym momencie musi być możliwy dostęp do każdej jednostki ładunkowej, czy tylko do co najmniej jednej danego rodzaju asortymentu itd.),
  - kryterium uniwersalności technologii (np. możliwość obsłużenia z wykorzystaniem danego rozwiązania technologicznego wielu różnych postaci materiałowych, wykorzystania środków transportowych do innych zadań realizowanych w magazynie, łatwej rekonfiguracji i rozbudowy układów transportu wewnętrznego),
  - kryterium bezpieczeństwa (z punktu widzenia zdrowia i życia pracowników, jak również prawdopodobieństwa uszkodzenia obsługiwanych materiałów oraz wyposażenia obiektu magazynowego).

W celu przeprowadzenia poprawnego i efektywnego w skutkach procesu doboru technologii składowania niezbędna jest znajomość możliwych sposobów przechowywania i oferowania materiałów oraz istniejących i dostępnych na rynku technologii. Klasyfikacja technologii składowania wynika zazwyczaj z:
- rodzaju obsługiwanych jednostek ładunkowych:
  - umożliwiające ich piętrzenie (składowanie bezregałowe),
  - wymagające regałów, nienadające się do piętrzenia (składowanie regałowe);
- wymagań dotyczących selektywności zapasu:
  - składowanie selektywne – z dostępem do każdej jednostki,
  - składowanie nieselektywne – bez bezpośredniego dostępu do jednostek;
- sposobu rozmieszczenia jednostek w strefie składowania:
  - składowanie blokowe,
  - składowanie rzędowe;
- rodzaju stosowanych środków transportowych.

Powyższa klasyfikacja umożliwia wyodrębnienie kilku zasadniczych sposobów składowania, tj. składowanie: blokowe bezregałowe, blokowe regałowe, rzędowe bezregałowe (z wykorzystaniem wózka podnośnikowego czołowego), rzędowe regałowe (z wykorzystaniem wózka podnośnikowego czołowego), rzędowe regałowe (z wykorzystaniem wózka podnośnikowego z widłami czołowo-bocznymi i bocznymi oraz układnic regałowych o małej i średniej wysokości podnoszenia), rzędowe regałowe (z wykorzystaniem układnic regałowych o dużej wysokości podnoszenia). Każdy z wymienionych sposobów składowania warunkuje wykorzystanie odpowiednich rodzajów i typów wyposażenia magazynowego, np.:
- regały paletowe stalowe: pojedynczej głębokości składowania, podwójnej głębokości składowania (double-deep), push-back (grawitacyjne), wjezdne (drive-in), przejezdne (drive-through), przepływowe grawitacyjne i napędzane, przepływowe wykorzystujące roboty sterowane radiowo, przejezdne (przesuwne) pojedynczej głębokości składowania,
- regały do materiałów sztukowych: półkowe, przepływowe grawitacyjne, przesuwne, karuzelowe, automatyczne wertykalne,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- regały do składowania kontenerów plastikowych (np. *miniload*),
- regały do dłużycy,
- regały automatyczne (wertykalne i horyzontalne),
- rozwiązania specjalizowane,
- antresole kratownicowe i podesty do podziału przestrzeni,
- nakładki na regały paletowe do składowania materiałów niespaletyzowanych,
- kombinowane konstrukcje regałowe.

W celu poprawnego (pod względem efektywności i wydajności) doboru technologii magazynowania kluczowa jest znajomość podstawowych parametrów, wad, zalet oraz ogólnych wytycznych dotyczących możliwości ich stosowania, np.:

- składowanie blokowe bezregałowe należy stosować gdy:
  - jest duża liczba jednostek ładunkowych danego rodzaju asortymentu,
  - konstrukcja jednostki materiałowej jest zwarta, sztywna i mało wrażliwa na uszkodzenia oraz samoczynne rozformowanie,
  - brak konieczności selektywności składowania,
  - brak wymaganej strategii FIFO;
- składowanie rzędowe w regałach półkowych należy stosować gdy:
  - jest duża liczba pozycji asortymentowej o małej liczbie sztuk,
  - są niewielkie opakowania jednostkowe lub zbiorcze,
  - jest wymagana selektywność składowania,
  - jest niewielka wielkość pobrań;
- składowanie rzędowe w ramowych rządowych regałach paletowych należy stosować gdy:
  - jest duża liczba pozycji asortymentowej o małej liczbie sztuk,
  - jest wymagana selektywność składowania,
  - są jednostki ładunkowe paletowe, których nie można piętrować;
- składowanie blokowe w regałach wjezdnych/przejezdnych należy stosować gdy:
  - jest duża liczba pozycji asortymentu,
  - jest wymagana selektywność składowania,
  - są jednostki ładunkowe paletowe, których nie można piętrować
  - są wysokie koszty powierzchni magazynowej lub dostępna mała powierzchnia składowania;
- składowanie blokowe w regałach przepływowych należy stosować gdy:
  - jest duża liczba pozycji asortymentu,
  - są jednostki ładunkowe paletowe, których nie można piętrować
  - jest konieczność stosowania zasady FIFO w obsłudze składowanych materiałów.

Więcej wad i zalet poszczególnych sposobów składowania oraz wybrane ich charakterystyki zestawiono w tabeli 4.1.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 4.1. Parametry, wady i zalety wybranych technologii składowania

Specjalistyczny sprzęt	Wykorzystanie powierzchni	Selektywność składowania	Czas dostępu	Zalety	Wady
SKŁADOWANIE BLOKOWE BEZREGAŁOWE					
NIE	50-80%	Mała	Średni	Dobre wykorzystanie przestrzeni; Brak nakładów inwestycyjnych LIFO	Utrudnione FIFO, mała selektywność; Konieczna podatność jednostek na piętrzenie; Składowanie niskie, Nadaje się do materiałów jednorodnych
SKŁADOWANIE RZĘDOWE W REGAŁACH PÓŁKOWYCH					
NIE	25-48%	Pełna	Krótki	Dostęp do opakowań jednostkowych (selektywność); Oferowanie dużej liczby asortymentów w małych ilościach (kompletacja); Odpowiednie do małych pobrań	Utrata przestrzeni na korytarze transportowe; Konieczność ręcznego uzupełniania regału (bez nośnika, np. palety); Ograniczenia wytrzymałości regałów
SKŁADOWANIE RZĘDOWE W REGAŁACH RAMOWYCH PALETOWYCH POJEDYNCZEJ GŁĘBOKOŚCI					
NIE	30-40%	Pełna	Krótki	Bezpośredni dostęp do jednostek; Pełna selektywność; Odpowiednie dla składowania wysokiego; Dla jednostek, których nie można piętrzyć; FIFO i LIFO	Utrata przestrzeni na korytarze transportowe

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 4.1. cd.

Specjalistyczny sprzęt	Wykorzystanie powierzchni	Selektywność składowania	Czas dostępu	Zalety	Wady
SKŁADOWANIE RZĘDOWE Z WĄSKIMI KORYTARZAMI W REGAŁACH RAMOWYCH PALETOWYCH POJEDYNCZEJ GŁĘBOKOŚCI					
TAK	35-55%	Pełna	Krótki	Bezpośredni dostęp do jednostek; Pełna selektywność; Odpowiednie dla składowania wysokiego; Dla jednostek, których nie można piętrzyć; FIFO i LIFO; Oszczędność powierzchni dzięki wąskim korytarzom	Konieczność zastosowania kosztownych wózków VNA do pracy w wąskich korytarzach
SKŁADOWANIE RZĘDOWE W REGAŁACH RAMOWYCH PALETOWYCH PODWÓJNEJ GŁĘBOKOŚCI					
TAK	34-50%	Średnia	Średni	Lepsze wykorzystanie przestrzeni; Odpowiednie dla składowania wysokiego; Dla jednostek, których nie można piętrzyć; LIFO	Utrata przestrzeni na korytarze transportowe; Selektywność ograniczona do kanału; Materiały jednorodne w kanale; Wymagane wózki ze specjalnymi przystawkami oraz szyny w regale
SKŁADOWANIE BLOKOWE W REGAŁACH WJEZDNYCH/ PRZEJEZDNYCH					
NIE	40-78%	Mała	Średni	Bardzo dobre wykorzystanie przestrzeni; Dla jednostek, których nie można piętrzyć; LIFO i FIFO	Selektywność ograniczona do kolumny regałowej; Wymagani wyszkoleni operatorzy wózków; Długi czas dostępu do jednostki; Przeważnie dla materiałów jednorodnych (mała liczba asortymentów); Wymagane nośniki (palety) bardzo dobrej jakości

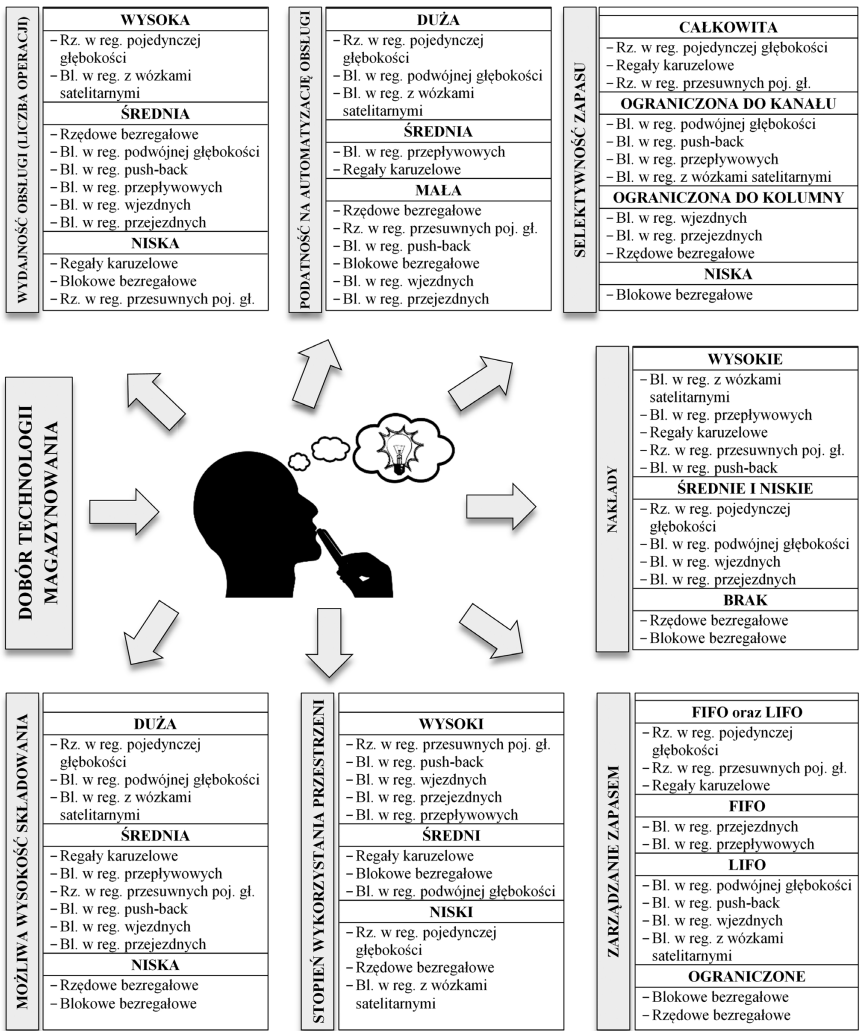
Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

SKŁADOWANIE BLOKOWE W REGAŁACH PUSH-BACK					
NIE	60-80%	Mała	Średni	Bardzo dobre wykorzystanie przestrzeni; Dla jednostek, których nie można piętrzyć; LIFO	Selektywność ograniczona do kanału regałowej; Wymagani wyszkoleni operatorzy wózków; Długi czas dostępu do jednostki; Przeważnie dla materiałów o niewielkiej liczbie asortymentów; Wymagane nośniki (palety) bardzo dobrej jakości
SKŁADOWANIE BLOKOWE W REGAŁACH PRZESUWNE					
NIE	70-90%	Mała	Długi	Bardzo dobre wykorzystanie powierzchni	Dostępny zazwyczaj pojedynczy korytarz międzyregałowy; Duże nakłady inwestycyjne; Długi czas dostępu; Mała selektywność składowania
SKŁADOWANIE BLOKOWE W REGAŁACH GRAWITACYJNYCH ROLKOWYCH (PALETOWYCH)					
NIE	60-80%	Mała	Średni	Bardzo dobre wykorzystanie przestrzeni; Dla jednostek, których nie można piętrzyć; FIFO	Selektywność ograniczona do kanału; Wysokie nakłady inwestycyjne; Przeważnie dla materiałów jednorodnych (mała liczba asortymentów); Wymagane nośniki (palety) bardzo dobrej jakości; Materiały jednorodne w kanale
SKŁADOWANIE RZĘDOWE W REGAŁACH Z WÓZKAMI SATELITARNYMI					
TAK	60-80%	Mała	Średni	Bardzo dobre wykorzystanie przestrzeni; Dla jednostek, których nie można piętrzyć; FIFO; Szerokie możliwości konfiguracyjne; Element automatycznych systemów magazynowych	Selektywność ograniczona do kanału; Bardzo wysokie nakłady inwestycyjne; Przeważnie dla materiałów jednorodnych (mała liczba asortymentów); Wymagane nośniki (palety) bardzo dobrej jakości; Materiały jednorodne w kanale

Źródło: opracowanie własne na podstawie [96], [163], [174].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 1602573A3463363

Jednym z najważniejszych etapów procedury prawidłowego doboru technologii składowania jest określenie podstawowych kryteriów doboru. Niezbędne jest, aby decydent wiedział, które aspekty są dla niego najważniejsze, np. wydajność procesu magazynowego czy wymagana powierzchnia magazynu, nakłady na obiekt czy roczne koszty eksploatacyjne jakie generuje. Świadomość własnych preferencji i potrzeb znacząco ułatwi wybór technologii oraz umożliwi osiągnięcie założonego celu. Wybrane kryteria doboru technologii magazynowania przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Kryteria doboru technologii magazynowania (Bl. w reg. oznacza składowanie blokowe w regałach; Rz. w reg. oznacza składowanie rzędowe w regałach)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [174].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Dobór technologii transportu wewnętrznego

Kolejnym aspektem, niezwykle istotnym z punktu widzenia wydajności i efektywności pracy obiektu magazynowego, jest zastosowana technologia transportu wewnętrznego. Technologia transportu wewnętrznego to sposób realizacji programu transportu i magazynowania wynikającego z zadania logistycznego w magazynach. Wobec tego, jest ona silnie związana z omawianą wcześniej technologią składowania (magazynowania). Bardzo często określone rodzaje regałów ze względu na swoje parametry wymagają zastosowania odpowiednich środków transportu wewnętrznego. Należy zatem dobór technologii transportu wewnętrznego i magazynowania rozważać wspólnie i uwzględniać ich wzajemne wpływy i zależności. Zależność obu technologii wynika najczęściej z dwóch podstawowych parametrów, które kształtują zarówno technologię składowania, jak i technologię transportu wewnętrznego, są to: wysokość składowania oraz szerokość korytarzy roboczych.

Technologia transportu wewnętrznego z zasady charakteryzuje się określonymi rodzajami i typami stosowanych środków transportu wewnętrznego oraz urządzeń do obsługi (przetwarzania) materiałów i informacji. Podstawowe środki transportu wewnętrznego można wyróżnić ze względu na sposób działania [174]:
- bierne,
- czynne o działaniu ciągłym i ograniczonym obszarze działania (przenośniki: rolkowe, wałkowe, łańcuchowe, taśmowe, podwieszane, elementy rozdzielająco-łączące),
- czynne o działaniu przerywanym i ograniczonym obszarze działania (dźwignice, układnice, suwnice, dźwigi, wyciągi, windy, wózki szynowe, łańcuchowe, podłogowe i inne),
- czynne o działaniu przerywanym i nieograniczonym obszarze działania (wózki unoszące, podnośnikowe, ciągniki, platformowe i inne).

Kolejnym zasadniczym kryterium klasyfikacji środków transportu wewnętrznego jest sposób w jaki wykonywane są przez nie zadania:
- ręczne – praca ludzi wsparta prostymi urządzeniami;
- zmechanizowane – praca ludzi wsparta urządzeniami mechanicznymi pozwalającymi na uzyskanie dużej wydajności i zmniejszenie wysiłku fizycznego;
- automatyczne – praca urządzeń, stosowanie automatycznych systemów transportu wewnętrznego, rola pracowników ograniczana jedynie do nadzoru i kontroli.

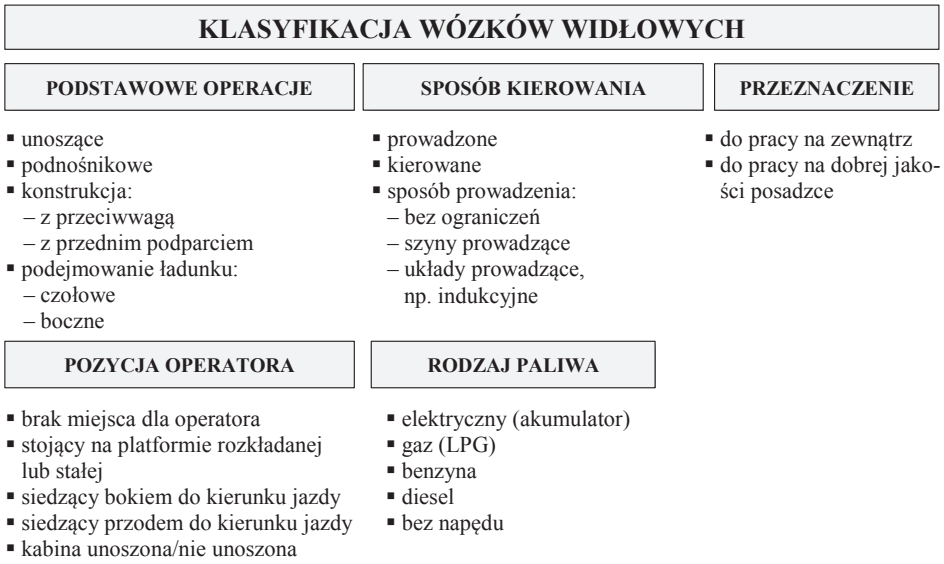
Szczególnie istotną grupę urządzeń magazynowych (ze względu na ich uniwersalność i powszechność stosowania) stanowią wózki widłowe. Można je klasyfikować między innymi ze względu na ich cechy konstrukcyjne, co zaprezentowana na rys. 4.2.

Pomimo iż wózki widłowe są najbardziej powszechnymi środkami transportu stosowanymi w magazynach, w tego typu obiektach można spotkać również

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

inne urządzenia, jak np.: urządzenia do przeładunku, układnice regałowe – AS/RS (Automated Storage/Retrieval System), przenośniki, wózki autonomiczne AGV, sortery. Wybór określonego rodzaju urządzeń do realizacji procesu magazynowego (technologii transportu wewnętrznego) podyktowany jest wieloma różnymi czynnikami, np.:

- wymaganą wydajnością układu,
- wielkością i stosunkiem kosztów pracy ludzkiej i pracy urządzeń,
- natężeniem strumieni materiałów obsługiwanych w układzie transportu wewnętrznego,
- postaciami i typami przemieszczanych jednostek logistycznych,
- technologią składowania i oferowania materiałów oraz wynikającymi z niej ograniczeniami dla środków transportu wewnętrznego,
- rodzajem i stanem podłoża (posadzki, nawierzchni),
- warunkami i organizacją pracy w określonych strefach funkcjonalnych (np. przestrzenie zamknięte, mroźnie, praca na zewnątrz).



Rys. 4.2. Klasyfikacja wózków widłowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [174].

Należy przy tym pamiętać, iż w celu maksymalizacji wydajności obiektu magazynowego środki transportu wewnętrznego powinny być dobierane niezależnie do poszczególnych jego obszarów (stref funkcjonalnych) i realizowanych przez nie zadań. Jednak bardzo często ze względu na zwiększenie uniwersalności rozwiązania i obniżenie kosztów eksploatacyjnych projektanci układów transportu dążą do pewnej standaryzacji, która objawia się

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ograniczaniem liczby różnych rodzajów urządzeń wykorzystywanych do zadań magazynowych.

Wybór technologii transportu wewnętrznego jest również związany z tzw. efektem skali. Duże natężenia przepływu materiałów w obiektach magazynowych usprawiedliwiają wykorzystanie drogich w zakupie i utrzymaniu technologii transportu, ale za to efektywnych i wydajnych. Jeżeli liczba zadań magazynowych do zrealizowania jest bardzo duża, to nawet niewielkie oszczędności czasu na każdym z nich będą prowadzić do dużych oszczędności w skali całego przedsiębiorstwa.

Aspekt oczekiwanej wydajności układu transportu wewnętrznego (obiektu magazynowego) i generowanych przez niego kosztów jest kluczowy w przypadku wyboru pomiędzy technologiami ręcznymi, zmechanizowanymi i zautomatyzowanymi. Dlatego decyzja o zastosowaniu rozwiązań automatycznych w zamian za pracę ludzką (bądź też rezygnacja z automatyzacji) musi być poprzedzona analizą struktury i natężenia przepływu materiałów w magazynie (lub w określonej jego strefie funkcjonalnej) oraz jednostkowych kosztów pracy ludzi i urządzeń.

Wobec powyższego łatwo zauważyć, iż dobór technologii transportu wewnętrznego jest procesem złożonym i trudnym do poprawnego zrealizowania. Prawidłowo zorganizowany układ transportu wewnętrznego i dobór odpowiedniej technologii transportu powinien zapewnić obsługę materiałów w magazynie przy jak najmniejszym zużyciu środków transportu, minimalnym czasie realizacji zadań oraz racjonalnych kosztach operacyjnych i eksploatacyjnych.

4.3.2. ORGANIZACJA PRACY OBIEKTU MAGAZYNOWEGO

W przypadku gdy w obiekcie magazynowym technologia magazynowania i transportu wewnętrznego jest już ustalona lub nie ma możliwości jej modyfikacji, wówczas jedynym sposobem determinującym wydajność i efektywność tego obiektu jest ukształtowanie i organizacja zachodzących w nim procesów. Jest to zagadnienie złożone i poruszające wiele różnorodnych aspektów związanych z magazynowaniem. Do najczęściej stosowanych praktyk związanych z organizacją pracy w obiektach magazynowych zalicza się:

- dobór i ukształtowanie stref funkcjonalnych magazynu,
- rozmieszczenie asortymentu w strefach składowania i oferowania materiałów,
- wyznaczanie ścieżek wg których pracownicy magazynowi realizują swoje zadania,
- harmonogramowanie zadań magazynowych i przydział do nich zasobów pracy,
- dobór strategii realizacji zadań magazynowych,
- dobór i wdrożenie systemów informatycznych oraz technologii wspomagających przetwarzanie informacji.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Dobór i ukształtowanie stref funkcjonalnych

W każdym obiekcie magazynowym wyróżnić można różnego rodzaju strefy funkcjonalne. Charakteryzują się one wydzieloną przestrzenią magazynową, wyposażeniem mechanicznym i niemechanicznym (choć w niektórych przypadkach są one jedynie pustą przestrzenią) oraz określonymi zadaniami jakie pełnią w ramach realizacji procesu magazynowego. Podział magazynu na odpowiednie rodzaje obszarów funkcjonalnych, ich wyposażenie oraz ukształtowanie jest bardzo istotne z punktu widzenia wydajności i efektywności obiektu, ponieważ bezpośrednio wpływa na czas wykonywania poszczególnych czynności magazynowych oraz czas odległości jakie pokonują zasoby pracy przemieszczając się pomiędzy kolejnymi miejscami wykonywania zadań.

Do podstawowych zagadnień związanych z doborem i ukształtowaniem stref funkcjonalnych zalicza się:

- wydzielenie w przestrzeni magazynowej niezbędnych z punktu widzenia realizacji procesu magazynowego obszarów funkcjonalnych,
- rozmieszczenie względem siebie wydzielonych obszarów,
- ukształtowanie układu obszarów, wykorzystując niezbędne w nim wyposażenie niemechaniczne.

W ramach pierwszego zagadnienia decydent (projektant, reorganizator powierzchni magazynowej) po wcześniejszej analizie zadania logistycznego i wynikającego z niego procesu magazynowego określa jakie obszary funkcjonalne powinny znajdować się w magazynie (np. strefa składowania, kompletacji, co-packingu, buforowania, identyfikacji i kontroli). Każdej z nich przydzielana jest niezbędna powierzchnia oraz określone zadania. Poprawne rozwiązanie niniejszego zagadnienia warunkuje możliwość sprawnej i efektywnej realizacji poszczególnych czynności magazynowych, ponieważ organizuje pracę magazynu, jednoznacznie wskazuje miejsca wykonania zadań, ogranicza problem zatłoczenia, kongestii i opóźnień spowodowanych brakiem wystarczającej przestrzeni do pracy.

Po zidentyfikowaniu wszystkich niezbędnych do pracy obiektu stref funkcjonalnych należy rozmieścić je względem siebie w obiekcie magazynowym. Prowadzi to do ukształtowania układu technologicznego magazynu (patrz rys. 3.1). Prawidłowy dobór układu technologicznego umożliwia skrócenie odległości jakie pokonują pracownicy przemieszczając się pomiędzy strefami, skracając tym samym czas niezbędny na realizację zadań magazynowych. To w rezultacie prowadzi do zwiększenia przepustowości obiektu magazynowego i efektywności realizowanych w nich procesów.

Ukształtowanie układu obszarów magazynowych sprowadza się do zagospodarowania ich powierzchni i rozmieszczenia w nich niezbędnego wyposażenia niemechanicznego. Do głównych zadań w tym przypadku należy określenie niezbędnej liczby miejsc składowania, buforowania i oferowania materiałów,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

wyznaczenie liczby potrzebnych lokacji magazynowych i pól odkładczych, określenie liczby i długości rzędów regałowych, korytarzy roboczych, korytarzy poprzecznych, dobór liczby bloków regałowych, a także organizacja ruchu w każdym z obszarów. Poprawne ukształtowanie stref funkcjonalnych prowadzi do zmniejszenia czasochłonności zadań wykonywanych w ich obszarze, ograniczenia kongestii i zwiększenia przepustowości.

Rozmieszczenie asortymentu

Problem przydziału asortymentu do lokalizacji dotyczy podjęcia decyzji gdzie i jak składować zbiory artykułów poszczególnych rodzajów (jednostek asortymentowych), aby zapewnić optymalne działanie obiektu magazynowego. Asortyment może być rozdzielany pomiędzy poszczególne strefy (oddziały) magazynu lub też przydzielany do konkretnych miejsc oferowania (składowania) w tych obszarach.

Decyzje dotyczące rozmieszczenia asortymentu w magazynach wpływają na niemal wszystkie kluczowe wskaźniki i parametry realizowanego w nich procesu magazynowego, jak np. czasochłonność, wydajność i zasobochłonność procesu magazynowego i jego składowych (kompletacji, wysyłki), a także wielkość generowanych przez nie kosztów. Wymagają one przy tym uwzględnienia szeregu zagadnień związanych z wyborem odpowiedniej metody, określeniem potrzebnej i dostępnej powierzchni i kubatury obiektu, zidentyfikowania wymogów artykułów związanych z ich składowaniem itp.

Istnieje wiele sposobów rozmieszczenia asortymentu w obiektach logistycznych. Do najczęściej stosowanych i analizowanych w literaturze problemu zalicza się m.in.: metodę losowego przydziału (random storage), metodę najbliższej wolnej lokalizacji (closest open location storage), metodę lokalizacji dedykowanych (dedicated storage), metodę całkowitego obrotu (full turnover storage), metodę przydziału według klas (class-based storage). Wobec tego problem rozłożenia artykułów w obszarach magazynowych może być rozwiązywany przez wykorzystanie różnych metod – począwszy od metod losowych, w których artykuły przydzielane są w sposób przypadkowy do wolnych miejsc składowania, przez metody najbliższego wolnego miejsca składowania i metody dedykowane (w których materiały każdego rodzaju mają przypisane stałe miejsc składowania), aż po metody przydziału oparte na klasach.

Należy również zauważyć, iż problem rozmieszczenia asortymentu nie sprowadza się jedynie do klasyfikacji, uszeregowania i pogrupowania dostępnego w systemie magazynowym asortymentu. Konieczne jest także odpowiednie jego ulokowanie w miejscach składowania. W tym celu niezbędne jest odpowiednie sparametryzowanie miejsc składowania W większości przypadków metody rozmieszczenia przydzielają uszeregowany asortyment kolejno do najbliższych miejsc składowania. Niemniej jednak istnieją także inne metody klasyfikacji lokacji magazynowych, które oparte są np.: na czasie dostępu (względem punktu

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

wejścia/wyjścia ze strefy) do lokacji, na odległości lokacji od wejścia/wyjścia ze strefy, jak również parametryzacja lokacji wzdłuż i w poprzek korytarzy roboczych (więcej informacji na ten temat przedstawiono w pracy [148]).

Wyznaczanie ścieżek realizacji czynności magazynowych

Czas poświęcony na przemieszczanie podczas realizacji zadań magazynowych generuje koszty, natomiast w żaden sposób nie zwiększa wartości dóbr dostarczanych do klienta. Dlatego również minimalizacja tego czasu często uważana jest za podstawowy etap w dążeniu do ulepszenia i zwiększania wydajności systemów magazynowych. To z kolei jest ściśle związane ze skróceniem długości dróg pokonywanych przez zasoby pracy (długość pokonywanej drogi jest jednym z podstawowych czynników wpływających na długość czasu przemieszczania się pracowników magazynowych). Poszukuje się zatem takich metod generowania tras, dla których możliwe będzie zminimalizowanie ich długości lub co najmniej znaczne ich ograniczenie. To z kolei może doprowadzić do znaczącego zwiększenia wydajności procesu magazynowego.

Bardzo często czynności magazynowe sprowadzają się do cykli transportowych prostych (podjęcie ładunku, jego przewóz, odłożenie w miejscu docelowym i powrót na pusto do miejsca rozpoczęcia cyklu). Planowanie i organizacja takich cykli polega głównie na odnalezieniu najkrótszej drogi pomiędzy dwoma przyjętymi punktami. Ze względu na często ograniczony i niewielki obszar obiektów magazynowych, a także niezbyt skomplikowaną sieć dróg transportu wewnętrznego, wyznaczanie tras cykli prostych nie przysparza zbyt dużych problemów. Zazwyczaj wybierane są one na bieżąco przez pracowników. Bardziej problematyczne jest wyznaczanie tras w rozbudowanych strefach regałowych z wieloma korytarzami poprzecznymi i roboczymi. W takich przypadkach wykorzystywane są różnego rodzaju narzędzia i metody wspomagające. Przykładem takiej metody może być np. heurystyka Dijkstry, czy A* (jej wykorzystanie zaprezentowano w wielu pracach, np.: [39], [100], [230]).

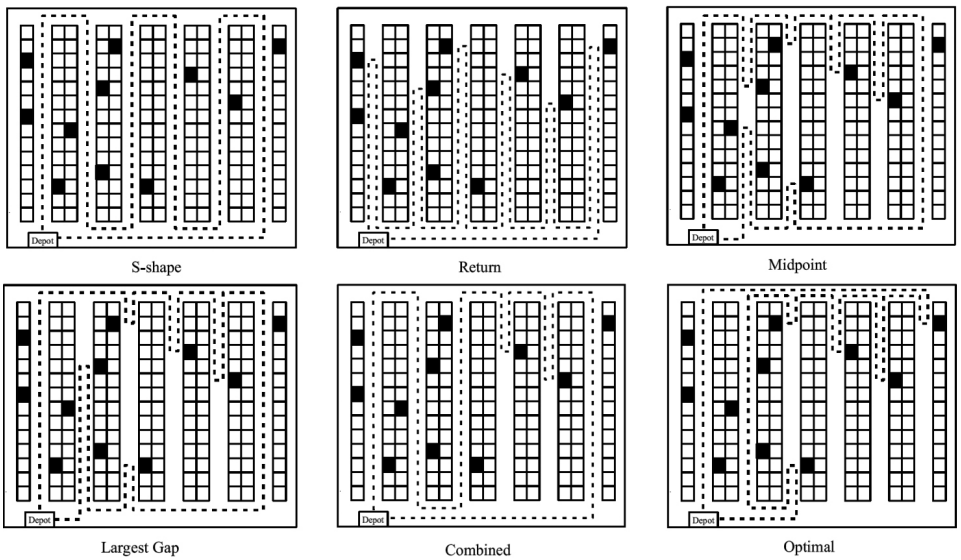
Inną grupą cykli transportowych wykonywanych podczas procesu magazynowego są cykle kombinowane. Składają się one z podjęcia ładunku, przewozu, odłożenia, przejazdu do kolejnego miejsca podjęcia, podjęcia, przewozu, odłożenia itd. Cykle kombinowane mogą być dwu- i wielokrotne, w zależności od liczby podjęć ładunków w pojedynczym cyklu. Specyficznym przypadkiem cykli kombinowanych realizowanych w procesach magazynowych są cykle kompletacyjne. Polegają one na poruszaniu się pomiędzy wieloma miejscami pobrań materiałów, pobieraniu ich zgodnie z listą kompletacyjną i odłożeniu kompletnej jednostki ładunkowej w założonym miejscu.

Problem wyznaczenia tras cykli kombinowanych sprowadza się zasadniczo do określenia sekwencji miejsc jakie będą odwiedzane podczas jego realizacji. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest wykorzystanie matematycznych modeli optymalizacyjnych. Przykładem takiego podejścia może być

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

implementacja zagadnienia komiwojażera do poszukiwania najkrótszych ścieżek w magazynie. W odniesieniu do cykli kombinowanych problem ten nazywany jest Steiner Traveling Salesman Problem, który generalnie jest nierozwiązywalny w czasie wielomianowym. Niemniej jednak w 1983 roku Ratliff i Rosenthal w pracy [84] zwrócili uwagę na fakt, iż dla prostych jednoblokowych, prostokątnych układów regałowych istnieje algorytm rozwiązujący ten problem w czasie liniowo zależnym od liczby korytarzy roboczych i liczby miejsc składowania artykułów.

Z użytkowego punktu widzenia podczas realizacji procesu magazynowego niezwykle istotny jest czas jaki należy poświęcić na znalezienie najkrótszej ścieżki. Dlatego również w obiektach magazynowych zamiast skomplikowanych metod optymalizacyjnych wykorzystuje się prostsze, łatwiejsze w implementacji i szybsze w działaniu metody heurystyczne. Do najbardziej znanych heurystycznych metod wyznaczania tras w magazynie zalicza się m.in.: metodę każdego korytarza (S-shape), metodę powrotną (return), metodę punktu środkowego (mid-point), metodę największego odstępu (largest gap), metodę kombinowaną (combined) oraz metodę optymalną (optimal) (patrz rys. 4.3). Algorytmy i sposoby wykorzystania metod heurystycznych w wieloblokowych układach regałowych omówiono i zaprezentowano ich wykorzystanie w pracy [145].



Rys. 4.3. Przykłady heurystycznych metod wyznaczania tras w jednoblokowych strefach regałowych

Źródło: [258].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Harmonogramowanie zadań magazynowych i przydział zasobów pracy

Kolejnym podejściem do zwiększania wydajności i efektywności procesu magazynowego jest harmonogramowanie zadań magazynowych i przydział zasobów pracy do ich realizacji. Problematyka harmonogramowania w ogólności może być rozumiana jako zagadnienie przydziału w czasie środków pracy, w celu wykonania zadań będących częścią pewnego procesu. W przypadku omawianego zagadnienia harmonogramowanie może być zatem rozumiane jako ustalanie kolejności wykonywania zadań magazynowych z wykorzystaniem zadanych zasobów pracy w celu minimalizacji łącznego czasu realizacji procesu magazynowego (wszystkich zadań magazynowych).

Istnieje wiele algorytmów rozwiązywania problemów szeregowania zadań, które można podzielić na: optymalizacyjne (dokładne) oraz aproksymacyjne (przybliżone). Narzędzia optymalizacyjne gwarantują znalezienie rozwiązanie optymalnego, jednakże przeważnie wymagają długiego czasu obliczeń, co często wyklucza je z zastosowań praktycznych. Przy zadaniach o większej skali stosuje się wyłącznie techniki aproksymacyjne. Zaliczyć można do nich np. symulowane wyżarzanie (Simulated Annealing) oraz Tabu Search [183].

Systemy informatyczne oraz technologie wspomagające przetwarzanie informacji

W celu zwiększenia wydajności procesów realizowanych w obiektach magazynowych bardzo często stosuje się w nich różnego rodzaju systemu informatyczne (zazwyczaj są to systemy klasy WMS – Warehouse Management Systems). Służą one do zarządzania przepływem informacji, a także przetwarzaniem i przekazywaniem ich do odpowiednich adresatów. Do podstawowych zadań tego rodzaju systemów należy:

- kontaktowanie obiektu magazynowego z jego otoczeniem (wymiana informacji z dostawcami i odbiorcami strumieni materiałów obsługiwanych przez magazyn),
- przetwarzanie zamówień klientów na zadania magazynowe,
- awiacja wysyłek u odbiorcy,
- harmonogramowanie i przydzielanie zadań odpowiednim zasobom pracy,
- zarządzanie stanami magazynowymi i zasobami pracy,
- implementacja i wykorzystanie algorytmów wspomagających pracę magazynu (np. rozmieszczenie asortymentu, wyznaczanie tras pracowników, grupowanie zleceń),
- integracja technologii wspomagających przetwarzanie informacji.

Implementacja w obiekcie magazynowym systemów klasy WMS umożliwia stosowanie w nich różnych technologii wspomagających przetwarzanie informacji. Do taki technologii zaliczyć można np. tagi RFID, kody kreskowe, terminale ADC (*Automated Data Capture*), technologię *Voice Picking* itp. Dodatkowo bez systemów informatycznych nie byłoby możliwości wykorzystania w magazynach rozwiązań automatyzujących pracę obiektu, jak np.: sortery, systemy AS/RS, układy przenośników, urządzenia AGV (*Automated Guided Vehicles*) czy inne autonomiczne systemy magazynowe.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

4.4. ZAGROŻENIA PRACOWNIKÓW MAGAZYNOWYCH

4.4.1. PROCESY PRZYJĘCIA I WYDANIA Z MAGAZYNU

Procesy przyjęcia i wydania czynności są wykonywane codziennie i wielokrotnie w każdym obiekcie magazynowym. Związane są one bezpośrednio z rozładunkiem i załadunkiem środków transportu zewnętrznego. W większości przypadków do ich realizacji wykorzystywane są wózki widłowe i inne urządzenia magazynowe.

Podczas procesów przyjęcia i wydania mogą mieć miejsce następujące zagrożenia dla pracowników magazynowych [202]:

- przygniecenie operatora wózka podnośnikowego przez wózek w sytuacji gdy środek transportu spadnie z pojazdu samochodowego (np. podczas wjeżdżania z rampy na naczepę samochodu, gdy w wyniku niepoprawnego unieruchomienia pojazd samochodowy zaczął oddalać się od rampy lub został zbyt daleko od rampy zaparkowany) – *zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem* operatora przez wózek podnośnikowy);
- potrącenie pracownika pieszego obsługującego dok przez operatora wózka jezdniowego podnośnikowego, który posiada ograniczone pole widzenia ze względu na transportowany ładunek – *zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem przez wózek podnośnikowy*, będący czynnikiem stwarzającym zagrożenie;
- potrącenie, zgniecenie pracownika pieszego obsługującego dok przez samochód ciężarowy w sytuacji, gdy pomagał kierowcy wprowadzić samochód ciężarowy do frontu przeładunkowego (kierowca podczas manewrów posiada niezwykle ograniczone pole widzenia obszaru z tyłu, gdyż obserwacja odbywa się za pomocą lusterek) – *zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem przez samochód ciężarowy*, będący czynnikiem stwarzającym zagrożenie;
- upadek pracownika z mostka przeładunkowego wskutek nieostrożnego zachowania i podchodzenia do krawędzi mostka przeładunkowego lub chęci skrócenia sobie drogi i wejścia do wnętrza poprzez otwarty front przeładunkowy (upadek człowieka nawet z tak niewielkiej wysokości może nieść poważne konsekwencje) – *zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem* operatora wózka przez wózek podnośnikowy, będący czynnikiem stwarzającym zagrożenie;
- poślizgnięcie się pracownika lub poślizg jadącego wózka podnośnikowego w wyniku wejścia lub najechania na znajdujące się wokół frontu przeładunkowego i placu manewrowego zanieczyszczenia (np. zatłuszczenie, zaśnieżenie, zawilgocenie lub zapylenie posadzki). W wyniku takiego zdarzenia może dojść do wydłużenia drogi hamowania lub straty panowania operatora nad wózkiem widłowym lub poślizgnięcia się pieszego, co uniemożliwi mu sprawne opuszczenie zagrożonego obszaru.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

4.4.2. PROCESY SKŁADOWANIA I BUFOROWANIA MATERIAŁÓW W OBRĘBIE MAGAZYNU

Procesy składowania i buforowania w obiektach magazynowych realizowane powinny być w ściśle określonych do tego obszarach. Może to być np. strefa składowania regałowego lub blokowego, jak również wydzielone pola odkładcze na potrzeby buforowania.

Podczas procesów składowania i buforowania mogą mieć miejsce następujące zagrożenia dla pracowników magazynowych:

- przygniecenie pracownika przez zawalający się regał – *zagrożeniu przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem przez regał*, będący czynnikiem stwarzającym zagrożenie,
- przygniecenie pracownika przez przewracający się stos (blok) składowanych jednostek ładunkowych – *zagrożeniu przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem przez jednostki ładunkowe*, będące czynnikiem stwarzającym zagrożenie,
- przygniecenie pracownika przez spadające jednostki ładunkowe składowane w regałach magazynowych – *zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem przez jednostki ładunkowe spadające* z *miejsc składowania*, będące czynnikiem stwarzającym zagrożenie,
- potrącenie w strefie składowania bądź buforowania pracownika pieszego realizującego inne procesy (np. procesy kontroli, kompletacji, inwentaryzacji) przez wózek widłowy – *zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem przez wózek widłowy*, będący czynnikiem stwarzającym zagrożenie,
- zderzenie, kolizja w strefie składowania bądź buforowania wózków magazynowych (wózki zazwyczaj poruszają się w wąskich korytarzach, gdzie jest ograniczona widoczność, korytarze te często się krzyżują gdzie może dojść do sytuacji kolizyjnych) – *zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem przez wózek widłowy*, będący czynnikiem stwarzającym zagrożenie.

Zagrożenie przygnieceniem, zgnieceniem, uderzeniem pracownika przez regał lub spadającą paletę może nastąpić na skutek [202]:

- nieprawidłowego posadowienia systemu regałów na podłożu, które nie zapewnia właściwej stateczności,
- wykonania montażu systemu regałów niezgodnie z projektem lub dokumentacją techniczną producenta, pomijanie urządzeń ochronnych, niepoprawne rozmieszczenie poziomów składowania itp.,
- wykonania montażu systemu regałów przez osoby nieposiadające odpowiedniego przygotowania,
- przystępowania do użytkowania systemu regałów bez odbioru przez nadzór techniczny,
- stosowania nieodpowiednich urządzeń transportowych do obsługi regałów,
- naruszenia konstrukcji regału, osłabiania konstrukcji regału poprzez wielokrotne, przypadkowe uderzenia w różne elementy konstrukcyjne regału (często

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

operatorzy wózków przy procesach załadunku/rozładunku regałów w wyniku braku uwagi bądź umiejętności uderzają jednostką ładunkową bądź wózkiem w elementy konstrukcyjne regałów uszkadzając je lub osłabiając połączenia elementów),
- braku bieżących i okresowych kontroli i konserwacji elementów systemu regałów, pozostawianie w eksploatacji elementów niesprawdzonych – zdeformowanych i skorodowanych,
- braku odpowiedniej szerokości korytarzy roboczych (w wyniku tego mniej doświadczeni, zmęczeni operatorzy mogą uderzyć wózkiem w konstrukcje regału),
- wykorzystania do budowy systemu regałowego elementów konstrukcyjnych o zbyt małej wytrzymałości (np. w celu ograniczenia nakładów na system regałowy)
- używania systemu regałów o nieodpowiednich wymaganiach obciążeniowych w stosunku do składowanych ładunków,
- źle dobranych wymiary elementów konstrukcyjnych systemów regałowych (np. trawersów poziomych do gniazd paletowych),
- nieodpowiedniej odległości między regałami (między „plecami") w przypadku regałów dwurzędowych,
- zastawiania regałów jakimikolwiek paletami, przedmiotami itp.,
- zbyt małej szerokości korytarzy roboczych.

4.4.3. PROCES KOMPLETACJI

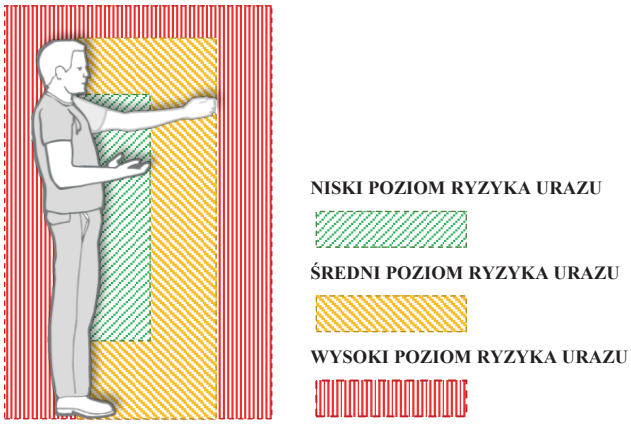
Według raportów GUS [303] w 2014 roku w obszarze transportu wewnętrznego i magazynowania doszło do niemal 6228 wypadków przy pracy. Wiele z nich dotyczyło pracowników kompletacyjnych. Są oni narażeni na niezliczoną liczbę urazów powstałych podczas sięgania, podnoszenia, pobierania i przenoszenia paczek (kompletowanych artykułów), przemieszczania się pomiędzy miejscami pobierania/oferowania asortymentu, pracy na wysokościach itp. Należy pamiętać, iż wszystkie zagrożenia życia i zdrowia pracowników zidentyfikowane podczas procesu składowania i buforowania (patrz rozdział 4.4.2) dotyczą również procesu kompletacji. Dodatkowe zagrożenia związane z tym procesem przedstawiono w niniejszym rozdziale.

Jednym z zagrożeń podczas kompletacji jest uraz pracownika kompletującego ręcznie podczas pobierania asortymentu z miejsc jego oferowania. Realizacja tego typu czynności może wymagać od pracowników pracy w niewygodnej pozycji, podnoszenia ciężkich paczek z wysokości poniżej kolan lub powyżej ramion, częstego skręcania tułowia i obracania się. Czynności te mogą prowadzić do wielu urazów i powodować bóle mięśniowe.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Najbezpieczniejszym dla pracownika sposobem ulokowania artykułów do pobrania jest umieszczenie ich blisko jego ciała i na wysokościach pomiędzy ramionami i kolanami, strefa ta nazywana jest *best working zone*. Na rys. 4.4 przedstawiono *best working zone* wraz z zaznaczonymi zakresami pracy i odpowiadającymi im poziomami ryzyka urazu pracownika. Na podstawie analizy rys. 4.4 można dostrzec pewien trend – im dalej od ciała, im wyżej niż linia ramion i niżej niż poziom kolan – tym większe ryzyko urazu pracownika. Istotnym jest więc odpowiednie przydzielenie lokacji oferowanym podczas kompletacji artykułom.

Dodatkowo, kompletacja może również wymagać podnoszenia ciężkich lub nieporęcznych ładunków, które mogą naciskać na plecy i ramiona pracowników kompletujących. Ciężkie ładunki mogą również spaść na stopy i palce lub przyciąć palce kompletującego, gdy są one odkładane. W zależności od kształtu, wielkości i wagi pobieranego materiału, jak również miejsca jego ulokowania względem ciała pracownika, zmienia się ryzyko urazu podczas pobierania. Na rys. 4.5 wskazano poziomy ryzyka urazu pracowników w przypadku pobierania artykułów o określonej wadze (w kilogramach) z określonych lokacji (wartości liczbowe opisują wagę artykułów).

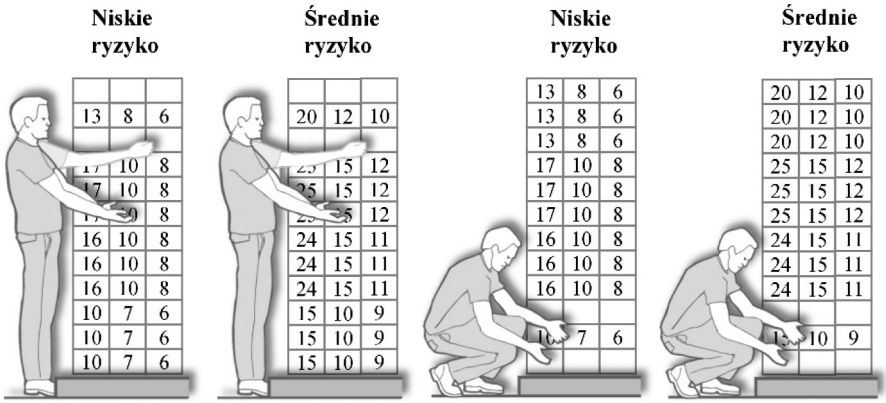


Rys. 4.4. Poziom ryzyka urazu pracowników podczas pobierania z różnych stref pobrań

Źródło: opracowanie własne na podstawie [301].

Bardzo często artykuły pobierane podczas kompletacji zlokalizowane są na znacznych wysokościach i nie ma możliwości ich pobrania bez wykorzystania dodatkowego sprzętu. W takich przypadkach bardzo często wykorzystywane są różnego rodzaju narzędzia i urządzenia od podestów roboczych, drabin, przez specjalistyczne wózki widłowe z podnoszoną kabiną operatora. Jednak w przypadku kompletacji na znacznych wysokościach trzeba szczególną uwagę przyłożyć do odpowiedniego lokowania produktów (w *best working zone*), do których musi dotrzeć uniesiony pracownik.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 4.5. Poziomy ryzyka urazu pracowników w przypadku pobierania artykułów o określonej wadze (w kilogramach) z określonych lokacji – przy założeniu 60 powtórzeń w ciągu 2 h

Źródło: opracowanie własne na podstawie [301].

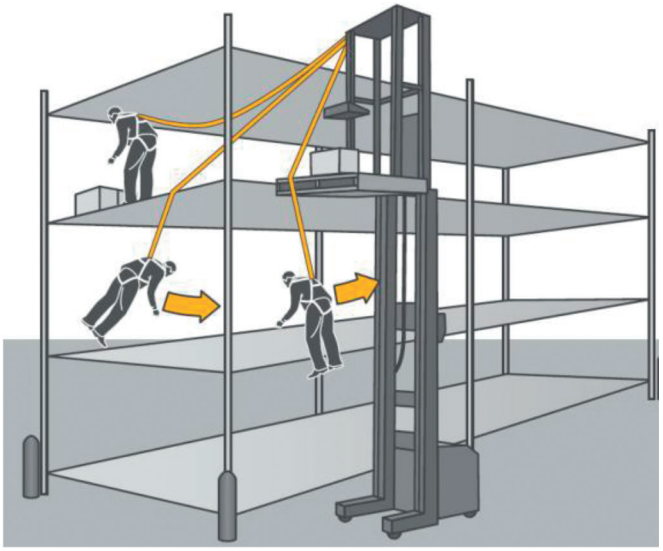
Istnieją różne kryteria doboru sposobu i metody kompletacji. Nie można jednak zapominać o bezpieczeństwie i o tym, iż zwykle im wyższa wysokość na jakiej będzie pracował pracownik, tym bardziej dotkliwe urazy w przypadku upadku (choć zdarzają się również śmiertelne upadki z niewielkich wysokości, np. 1 m). Wobec tego z punktu widzenia bezpieczeństwa i ryzyka urazów powstałych w wyniku upadku pracownika, platformy będą lepsze niż drabiny, a praca z poziomu posadzki lepsza niż z platform.

Niemniej jednak, jak wynika z analizy raportów o wypadkach w obiektach magazynowych, wiele urazów pracowników, tak podczas całego procesu magazynowego, jak i podczas kompletacji zamówień, związane jest z wykorzystaniem na potrzeby komisjonowania środków transportu wewnętrznego – wózków kompletacyjnych. Tego typu wózki bardzo często, oprócz standardowego przemieszczania się w poziomie, umożliwiają podnoszenie operatorów na wymaganą wysokość, gdzie realizują oni procesy kompletacyjne. I z ich udziałem może również dojść do wielu sytuacji niebezpiecznych i wynikających z nich urazów pracowników (więcej zagrożeń związanych z udziałem środków transportu wewnętrznego przedstawiono w rozdziale 4.4.4).

Nieuwaga, rutyna, nieprawidłowe korzystanie z wózków widłowych do kompletacji dwuwymiarowej może prowadzić do upadku pracowników z dużych wysokości, upuszczenia materiałów ze znacznych wysokości i zagrażanie tym samym znajdującym się poniżej innym pracownikom, jak również kolizji z innymi pracownikami, wózkami czy zderzeń z wyposażeniem niemechanicznym. Zabezpieczeniem przeciw upadkom z wysokości mogą być oczywiście różnego rodzaju pasy i rozwijane szelki. Niestety, bardzo często są one ignorowane przez pracowników bądź też są zbyt luźne, zbyt długie i nie chronią odpowiednio,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

gdyż umożliwiają wypadnięcie pracownika poza obrys platformy (kabiny wózka kompletacyjnego) i zawiśnnięcie. Może w takim przypadku dość również do wystąpienia efektu „wahadła" (*pendulum effect*), podczas którego pracownicy kompletujący na wysokościach i wyposażeni w zbyt długie pasy bezpieczeństwa wypadają poza kabiną, zawisają na pasach (smyczy) i w wyniku bezwładnego ruchu wahadłowego doznają urazów poprzez uderzenie w regał, maszt wózka bądź inne twarde elementy wyposażenia strefy kompletacji, ostre narożniki regałów (patrz rys. 4.6). W konsekwencji może to doprowadzić do złamań i innych obrażeń mechanicznych ciała. Dodatkowo należy pamiętać, że każda część ciała operatora, która znajduje się poza obrysem platformy/kabiny wózka może być potrącona, zraniona przez spadające z góry przedmioty.



Rys. 4.6. Efekt wahadła (*pendulum effect*) pojawiający się po upadku pracownika ze zbyt luźnymi pasami bezpieczeństwa

Źródło: [71].

4.4.4. PROCESY PRZEMIESZCZANIA Z WYKORZYSTANIEM WÓZKÓW MAGAZYNOWYCH

Współcześnie szeroko rozwinięty rysunek usług logistycznych charakteryzuje się intensywnymi i regularnymi przepływami materiałowymi w różnego rodzaju systemach logistycznych oraz zlokalizowanych w ich obszarze obiektach logistycznych. Doprowadziło to do wzrostu znaczenia transportu wewnętrznego. Potrzeba szybkiej realizacji ogromnej liczby czynności magazynowych wymaga często

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

zastosowania dużej liczby środków transportu wewnętrznego. Wszechobecny trend do ograniczania powierzchni magazynowych (ze względu na chęć zmniejszania kosztów działalności przedsiębiorstw) powoduje, że na małych powierzchniach obiektów magazynowych, wypełnionych ładunkami, porusza się zazwyczaj wiele środków transportu wewnętrznego. Towarzyszący temu ruch pieszy znacząco wpływa na zwiększenie zagrożeń występujących w transporcie wewnętrznym.

Prowadzone badania i opracowywane raporty wskazują, że wiele urazów pracowników w magazynie jest związanych z użyciem wózków widłowych jako środków do przemieszczania się i obsługi jednostek ładunkowych. Obecność pieszych lub innych wózków widłowych w tych samych obszarach może prowadzić do różnego rodzaju kolizji i potrąceń. Dodatkowo, jeżeli w realizacji określonego etapu procesu magazynowego bierze równocześnie udział więcej niż jeden wózek, może dojść do pojawienia się zjawiska kongestii i zatorów. One z kolei zwiększają opóźnienia pracowników, przestoje, zdenerwowanie, rozkojarzenie, co znacznie zwiększa prawdopodobieństwo pojawienia się kolizji, potrąceń, upadków i urazów pracowników.

Na podstawie klasyfikacji zawartej w [12], przyczyny wypadków związanych ze środkami transportu wewnętrznego można podzielić na następujące grupy:

- *błędy projektowe/konstrukcyjne* – są to m.in. różnego rodzaju wady konstrukcyjne urządzenia, układu napędowego, sterowania, instalacji elektrycznej, hydraulicznej i pneumatycznej, niewłaściwy dobór wymiarów i materiałów, niewłaściwe zabezpieczenia urządzenia;
- *wada wytwarzania (produkcyjna – wykonania, montażu)* – m.in. wady połączeń, wady przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej, niedotrzymanie warunków DTR (dokumentacji techniczno-ruchowej)/instrukcji użytkowania przy montażu urządzenia;
- *przyczyny materiałowe* – m.in. ukryte wady materiałowe, „zmęczenie" materiału, pogorszenie się własności materiału w czasie eksploatacji, oddziaływanie substancji żrących bądź korozji;
- *błędy eksploatacyjne* – m.in. niewłaściwa konserwacja oraz kontrola urządzenia i jego układów zabezpieczających, niewłaściwe naprawy i przeróbki, wadliwe działanie urządzeń zabezpieczających, niewłaściwa organizacja miejsca pracy, niedotrzymanie warunków DTR przy eksploatacji urządzenia, nieodpowiednie kwalifikacje osób je obsługujących;
- *czynniki zewnętrzne* – w tej grupie wyróżniamy klęski żywiołowe, pożar, zalanie;
- tzw. przyczyny niewyjaśnione.

Jak wynika z analiz przeprowadzonych przez autora publikacji [99], najczęstszą przyczyną wypadków przy pracy wózków magazynowych były błędy eksploatacyjne, a następnie błędy konstrukcyjne i wady wytwarzania. Dodatkowo na podstawie [12], [275] możliwe jest wykonanie zestawienia sytuacji zagrażających

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

bezpieczeństwu i prowadzących do wypadków z wykorzystaniem wózków widłowych (w nawiasie podano procentowy udział w odniesieniu do zarejestrowanych wypadków) w latach 2003–2010 w Polsce:
- potrącenie przez jadący wózek (12,5%);
- podnoszenie człowieka na widłach wózka (7,5%);
- przeciążenie wózka (0,8%);
- utrata stateczności wózka na zakręcie (7,5%);
- kolizja wózków (3,2%);
- poparzenie na wózku (1,7%);
- zahaczenie widłami wózka o stały element (3,3%);
- upadek wózka z rampy przeładunkowej (5,8%);
- przygniecenie transportowanym ładunkiem (11,7%);
- przygniecenie wózkiem bądź osprzętem roboczym (16,7%);
- uderzenie transportowanym ładunkiem (4,2%);
- najechanie, uderzenie wózkiem (20,9%);
- uderzenie wózkiem przy cofaniu (4,2%).

Według statystyk Administracji Bezpieczeństwa i Higieny Pracy w USA (OSHA) szacuje się, że wszystkie wózki widłowe pracujące w USA co roku przyczyniają się do więcej niż 100 000 wypadków, co w rezultacie prowadzi do 94 750 urazów pracowników magazynowych. Dodatkowo, prawie 80% wypadków wózków widłowych odbywa się z udziałem pieszego [302]. Jako główne przyczyny wypadków z udziałem wózków widłowych należy wymienić [268]:
- brak wiedzy lub umiejętności operatora,
- nieuwaga operatora,
- brawura operatora,
- zły stan urządzeń,
- usterka mechaniczna urządzeń,
- defekt konstrukcyjny dowolnej części urządzenia.

Raporty OSHA dodatkowo donoszą, iż 70% wszystkich wypadków z udziałem wózków można by uniknąć poprzez standaryzację procedur szkoleniowych operatorów i bezpieczeństwa.

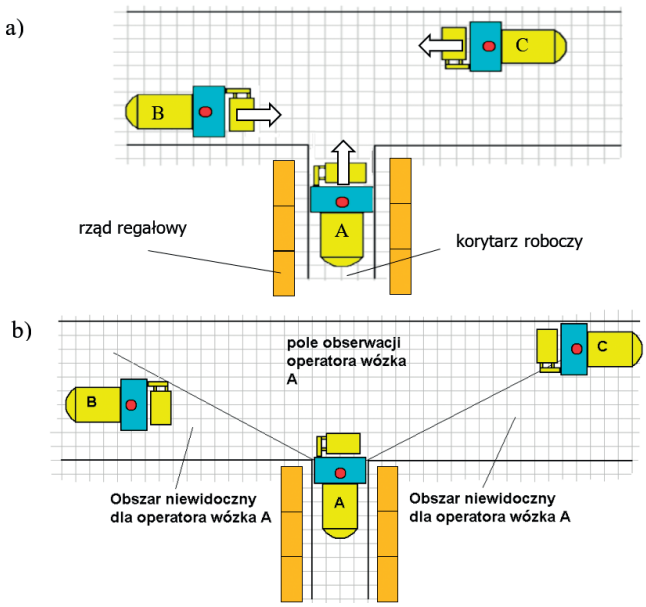
W przypadku procesów magazynowych najbardziej prawdopodobne zagrożenia dla pracowników związane z udziałem wózków dotyczą [202]:
- potrącenia pieszego przez wózek,
- uderzenia operatora wózka przez spadające artykuły z wyższych poziomów,
- uderzenia przechodnia przez spadające artykuły z wyższych poziomów,
- nieuważnego wsiadania i wysiadania z kabiny wózka widłowego,
- przewrócenia się wózka widłowego,
- kolizji wózka z innymi pojazdami lub obiektami stacjonarnymi,
- uderzenia w nieruchome obiekty przez wystającą poza obrys kabiny część ciała operatora.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Częstym i powtarzającym się zachowaniem niebezpiecznym, bezpośrednio prowadzącym do wypadku, jest przebywanie osób trzecich podczas pobierania, czy manewrowania z ładunkiem między regałami wózków widłowych. W sytuacjach takich bardzo często dochodzi do potrącenia osób trzecich i współpracowników. Wypadki takie zaliczane są na ogół do ciężkich. Dochodzi do obrażeń organów wewnętrznych w wyniku przygniecenia pracownika do regału magazynowego, zranienia kończyn dolnych, stóp, rąk, głowy [202].

W każdym obiekcie magazynowym procesy przemieszczania ładunków powinny odbywać się w obszarze ściśle określonych dróg transportu wewnętrznego. Drogi te ze względu na ograniczony obszar magazynu często się krzyżują. W tych miejscach (skrzyżowania dróg transportu wewnętrznego) może dojść do wielu sytuacji niebezpiecznych dla operatorów wózków widłowych i pracowników poruszających się pieszo. W wyniku nieuwagi operatorów, zmęczenia, nadmiernej prędkości czy ograniczonej widoczności istnieje możliwość zajścia sytuacji kolizyjnych i wypadków z ich udziałem.

Na rys. 4.7 i rys. 4.8 przedstawiono przykładowe sytuacje potencjalnie niebezpieczne, do których może dojść na skrzyżowaniu dróg transportu wewnętrznego. Jeden z wózków widłowych (**A**) znajduje się w korytarzu roboczym, pozostałe dwa (**B**, **C**) w korytarzu poprzecznym (rys. 4.7a). Wszystkie trzy środki transportu przemieszczają się w wyznaczonych kierunkach.



Rys. 4.7. Przykładowa sytuacja na skrzyżowaniu dróg transportu wewnętrznego (a) i pole widzenia operatora opuszczającego korytarz roboczy (b)

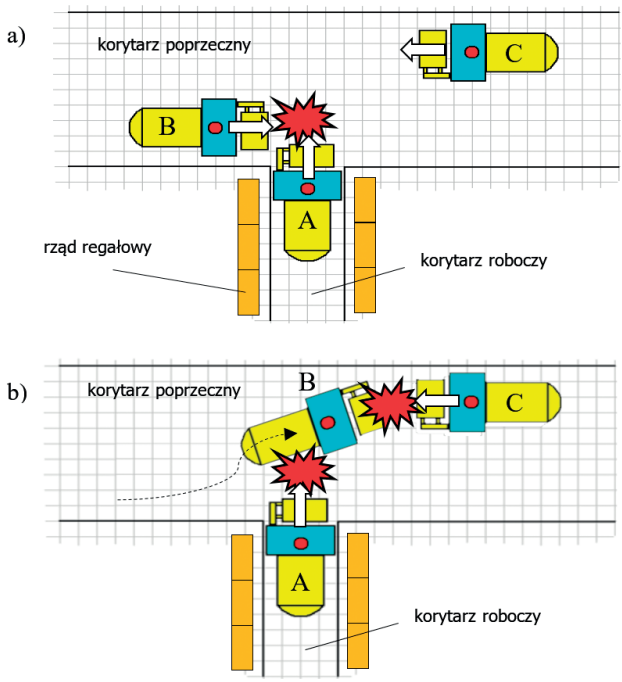
Źródło: opracowanie własne na podstawie [250].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wózek **B** porusza się na wprost z maksymalną prędkością, trzymając się jak najbliżej prawej strony korytarza poprzecznego ze względu na zbliżający się z naprzeciwka wózek **C**. Równocześnie wózek **A** zamierza opuścić korytarz roboczy i wjechać w korytarz poprzeczny. Dodatkowo korytarz roboczy zlokalizowany jest pomiędzy dwoma rzędami regałów, co znacząco ogranicza widoczność operatorowi wózka **A** (rys. 4.7b).

Jak zaprezentowano na rys. 4.7b, gdy wózek **A** zatrzyma się dokładnie na końcu korytarza roboczego (bez wjazdu do korytarza poprzecznego), ze względu na konstrukcję wózka i parametry jednostki ładunkowej, operator wózka **A** będzie znajdował się około 1500 mm od linii końca korytarza roboczego. W takiej sytuacji pole widzenia operatora jest ograniczone narożnikami rzędów regałowych. Operator widzi więc tylko obiekty, które znajdują się na wprost korytarza roboczego i w niewielkiej od niego odległości (rys. 4.7b). To powoduje, iż operator nie ma możliwości upewnienia się, czy manewr opuszczenia korytarza roboczego nie utrudni jazdy innym wózkom lub nie spowoduje zagrożenia. Analiza różnych wariantów zatrzymania wózka **A** przedstawiona w [250] wskazuje, iż zwiększenie widoczności możliwe jest dopiero w przypadku częściowego opuszczenia przez ten wózek korytarza roboczego, co przedstawiono na rys. 4.7.

W takiej sytuacji może dojść do zderzenia się wózka **A** oraz **B** (rys. 4.8a). Możliwa jest też sytuacja, w której operator wózka **B**, usiłując wyminąć wózek **A** (lub uderzony już przez wózek **A**), zderza się z wózkiem **C** nadjeżdżający z naprzeciwka (rys. 4.8b).



Rys. 4.8. Przykładowe sytuacje kolizyjne na skrzyżowaniu dróg transportu wewnętrznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [250].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

To z kolei może doprowadzić do uszkodzeniu kosztownych środków transportu, ładunku, a także narażenia operatorów na utratę zdrowia a nawet życia. Należy zatem przyjąć, iż każde skrzyżowanie dróg transportu wewnętrznego, a szczególnie korytarzy roboczych i poprzecznych, jest potencjalnym miejscem poważnego wypadku. Wobec tego trzeba podjąć wszelkie możliwe środki ostrożności i zwiększania poziomu bezpieczeństwa w tych obszarach (więcej informacji na temat kolizji wózków widłowych i sposobów ich unikania przedstawiono w rozdziale 4.5 oraz 8).

Ważnym problemem związanym z bezpieczeństwem pracy w obiektach magazynowych jest „brawura" operatorów wózków widłowych. Bardzo często ze względu na nierozwagę i brak świadomości zagrożeń rozwijają oni znaczne prędkości w halach magazynowych. Należy dodatkowo zauważyć, iż często transportują oni duże ładunki (w znacznym stopniu ograniczające widoczność), przez co może dojść do niewłaściwego postrzegania przez nich otoczenia, ryzyka zbyt późnego zauważenia przeszkód na drodze (np. wtargnięcia osób trzecich, czy też pojawienia się innego środka transportowego). To, w połączeniu z nadmierną prędkością, znacząco zwiększa ryzyko wystąpienia sytuacji niebezpiecznych. Dlatego bardzo istotnym aspektem wpływającym na bezpieczeństwo w obiektach magazynowych jest prędkość poruszania się środków transportu wewnętrznego.

Prędkość wózka widłowego z napędem przemysłowym jest podstawowym czynnikiem wpływającym na wydajność systemu magazynowego i bezpieczeństwo pracy w tym systemie [81], [125], [132]. Wysoka prędkość może skrócić czas realizacji zadań magazynowych. Niemniej jednak, wiele sytuacji niebezpiecznych w magazynach wynika właśnie ze wspomnianej już nadmiernej prędkości z jaką poruszają się operatorzy środków transportu wewnętrznego. To prowadzi do wypadków, kolizji, przewróceń wózków i innych niebezpiecznych sytuacji. Należy również pamiętać, iż prędkość z jaką poruszają się wózki bezpośrednio rzutuje na długość drogi hamowania. Wraz ze wzrostem wspomnianej prędkości wydłuża się droga hamowania (patrz tabela 4.2 oraz tabela 4.3). W celu uniknięcie potencjalnych kolizji, wózek powinien się poruszać z taką prędkością, aby droga zatrzymania wózka była nie większa niż odległość między wózkiem a przeszkodą (np. osobą lub innym wózkiem) pojawiającą się na jego drodze.

Tabela 4.2. Długość drogi zatrzymania wózka bez ładunku przy różnych prędkościach jego ruchu

Nazwa parametru	Wartość parametru					
Prędkość jazdy [km/h]	4	5	6	8	10	12
Prędkość jazdy [m/s]	1,11	1,39	1,67	2,22	2,78	3,33
Droga hamowania [m]	0,47	0,61	0,77	1,10	1,48	1,90
Droga zatrzymania [m]	1,6	2	2,5	3,4	4,3	5,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie [269].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Przy tym skuteczność hamowania powinna być taka, aby nie nastąpiła utrata stateczności wózka lub spadnięcie przewożonego ładunku [221].

Na podstawie badań przedstawionych w [269] w tabeli 4.2 zestawiono długość dróg zatrzymania się wózka jadącego bez ładunku z różnymi prędkościami. W przeprowadzonych badaniach uwzględniono drogę hamowania oraz drogę zatrzymania. Pierwszy z parametrów odnosi się jedynie do dystansu jaki pokona wózek od momentu rozpoczęcia hamowania do jego całkowitego zatrzymania. W przypadku drogi zatrzymania, oprócz zasadniczej odległości pokonywanej podczas hamowania, uwzględniona jest dodatkowo długość drogi jaką pokona wózek w czasie reakcji operatora (tj. od chwili zauważenia przez niego niebezpieczeństwa do momentu rozpoczęcia hamowania). Podobne badania, ale dla wózków magazynowych poruszających się z ładunkiem, zostały przeprowadzone przez Monash University Accident Research Center [82], [270]. Ich wyniki przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Długość drogi zatrzymania wózka z ładunkiem

Nazwa parametru	Wartość parametru			
Prędkość jazdy [km/h]	6	8	10	12
Prędkość jazdy [m/s]	1,67	2,22	2,78	3,33
Droga zatrzymania [m]	3,2	4,6	6,2	7,9

Źródło: opracowanie własne na podstawie [82], [269], [270].

Badania, których wyniki zawarto w tabeli 4.2 oraz tabeli 4.3 przeprowadzone były z wykorzystaniem wózka średniej wielkości, w dobrych warunkach pracy (tzn. na suchej, poziomej i równej nawierzchni) wyposażonego w prawidłowe dla danych warunków pracy ogumienie kół.

Przedstawione wyniki (patrz tabela 4.2 oraz tabela 4.3) wskazują, że w przypadku wózka poruszającego się z ładunkiem długość drogi zatrzymania jest zdecydowanie większa niż wózka bez ładunku. Dodatkowo wraz ze wzrostem prędkości wózka różnica ta zwiększa się. Główną tego przyczyną jest to, iż podczas zatrzymywania wózka z ładunkiem nie można wykorzystywać maksymalnych możliwości układu hamulcowego, ponieważ grozi to spadnięciem ładunku lub nawet przewróceniem się wózka. To w efekcie powoduje zwiększenie długości drogi zatrzymania wózka [270]. Zaprezentowane w [82], [269], [270] badania wskazują, iż długość drogi zatrzymania wózka zależy od takich czynników, jak:

- prędkość, z jaką wózek się porusza,
- czas reakcji kierowcy,
- masa wózka i masa ładunku jaki on przewozi,
- rodzaj i stan ogumienia kół,
- rodzaj i stan nawierzchni drogi.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wobec tego, zakładając że wartość czasu reakcji operatora zmienia się w niewielkich przedziałach a stan ogumienia wózków i nawierzchni w obiektach magazynowych jest prawidłowy, wówczas kluczowym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo pracowników magazynowych jest prędkość poruszania się wózków. Przedstawione wyniki badań wskazują również, że wraz ze wzrostem prędkości jazdy zwiększa się równocześnie ryzyko wypadku lub kolizji.

Rozwijanie znacznych prędkości może również doprowadzić do utraty kontroli nad wózkiem. Jest to związane z dużą zwrotnością tych urządzeń, i bywa przyczyną wypadków (w przypadku szybkiego najechania na niewielką przeszkodę, np. krawężnik, dochodzi do utraty stateczności wózka).

Wiele z wymienionych w rozdziale zagrożeń związanych jest bezpośrednio z czynnikiem ludzkim. Oznacza to, że bardzo często w wyniku zmęczenia, niedoświadczenia, brawury, braku kompetencji pracowników magazynowych itp. dochodzi do sytuacji niebezpiecznych w układach transportu wewnętrznego. Wobec tego należy szczególną uwagę przykładać do odpowiedniego szkolenia i uświadamiania pracowników magazynowych. Wdrażanie i przestrzeganie w obiektach magazynowych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) jest podstawowym i kluczowym sposobem zwiększania bezpieczeństwa pracy. Wybrane podejścia do ograniczania ryzyka i zagrożeń w procesach magazynowych przedstawiono w rozdziale 4.5.

4.5. WYBRANE PODEJŚCIA DO OGRANICZANIA RYZYKA I ZAGROŻEŃ W PROCESACH MAGAZYNOWYCH

W przypadku obiektów magazynowych istnieje wiele różnych podejść i sposobów ograniczania ryzyka i zagrożeń oraz zwiększania bezpieczeństwa pracy. Mowa w tym przypadku zarówno o zadaniach jakie należy wykonać już na etapie projektowania tego typu obiektów, jak również podczas organizacji ich pracy, bieżącej kontroli, ostrzegania przed potencjalnym niebezpieczeństwem itp. Wybrane spośród wspomnianych podejść przedstawione zostaną w niniejszym rozdziale.

Projekt i organizacja układu transportu wewnętrznego

Jednym z podejść do ograniczania zagrożeń jakim podlegają pracownicy magazynowi, ryzyka wypadków i urazów jest uwzględnienie aspektu bezpieczeństwa już na etapie projektowania i organizacji obszarów transportu wewnętrznego i magazynowania. Dotyczy to m.in. rozważenia różnych układów obszarów pracy (np. rozmieszczenie regałów magazynowych, rozmieszczenie stanowisk pracy), rozplanowanie dróg transportu wewnętrznego i ustalenie odpowiedniego sposobu zarządzania ruchem (np. odseparowanie dróg transportu pieszego

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

i zmechanizowanego, ograniczenie liczby skrzyżowań dróg) oraz stosowania odpowiednich urządzeń, narzędzi, systemów i znaków ostrzegania, informowania i zwiększania widoczności (np. sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach, luster sferycznych, dźwiękowych i wizualnych systemów ostrzegania).

Do podstawowych zadań niezbędnych w celu zwiększenia bezpieczeństwa w układach transportu wewnętrznego można zaliczyć:

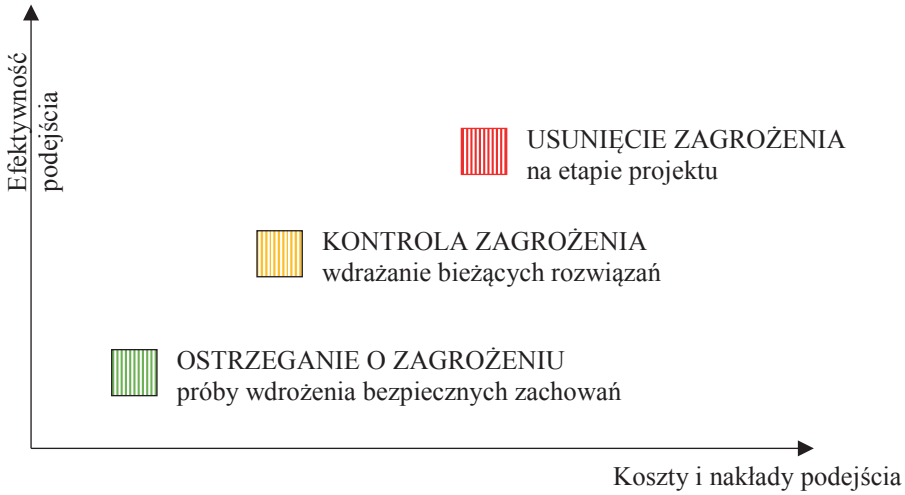
- organizację ruchu pieszych i wózkowych,
- dobór odpowiedniej maksymalnej prędkości ruchu wózków,
- wykorzystanie ograniczników prędkości w urządzeniach transportu wewnętrznego (tzw. ślimaków),
- minimalizację skrzyżowań dróg transportu wewnętrznego,
- identyfikację innych niż skrzyżowania miejsc kolizyjnych i próba ograniczania natężenia ruchu w tych miejscach,
- ograniczanie martwych pól pod względem widoczności – wykorzystanie luster sferycznych, kamer cofania, sensorów i alarmów pomagających operatorom wózków dostrzec wszelki ruch wokół wózka (badania na temat wpływu zastosowania luster sferycznych na bezpieczeństwo w magazynach przedstawiono w [250]),
- wykorzystanie i stosowanie ostrzeżeń wizualnych na poruszających się wózkach (migające światło, punkt świetlny rzucany na posadzkę przed wózkiem) oraz oznaczania takich urządzeń jaskrawymi, dobrze widocznymi kolorami itp.

Z punktu widzenia ergonomii i zarządzania bezpieczeństwem istnieją trzy podstawowe podejścia do zwiększania bezpieczeństwa w obiektach magazynowych:

- *usunięcie zagrożenia* – może ono polegać na np. projektowaniu całkowicie rozdzielonych i niekrzyżujących się dróg pieszych i urządzeń, uniemożliwiając im jakikolwiek kontakt,
- *kontrola zagrożenia* – próba jego ograniczania, np. poprzez instalowanie barier uniemożliwiających kontakt pieszych z wózkami bądź instalowanie urządzeń, sensorów i systemów bezpieczeństwa w wózkach uniemożliwiających przekroczenia dopuszczalnej prędkości, ładowności,
- *ostrzeganie o niebezpieczeństwie* – próby wdrażania zachowań zwiększających bezpieczeństwo, np. malowanie przejść dla pieszych, instalowanie luster sferycznych, instalowanie w wózkach sygnalizatorów świetlnych i dźwiękowych ostrzegających o jego obecności w bliskim otoczeniu, wdrażaniu procedur bezpieczeństwa itp.

Przedstawione podejścia tworzą tzw. *hierarchię skuteczności* [164]. Usunięcie zagrożenia jest zwykle skuteczniejsze niż jego kontrola, co z kolei jest bardziej skuteczne niż jedynie ostrzeganie przed niebezpieczeństwem. Dodatkowo, należy zauważyć iż istnieje korelacja między efektywnością a kosztem wdrożenia określonego podejścia do zwiększania bezpieczeństwa (rys. 4.9).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 4.9. Hierarchia skuteczności zarządzania bezpieczeństwem

Źródło: opracowanie własne na podstawie [164].

W układach transportu wewnętrznego najpierw rozpatrywane powinno być pierwsze z podejść przedstawionych powyżej, czyli całkowita izolacja obszarów ruchu wózków i pieszych (projektowanie bezkolizyjnych skrzyżowań, kładek dla pieszych, itp.). Jeżeli jednak takie rozwiązanie z jakichkolwiek powodów nie jest możliwe należy rozważyć:

- montaż barier ograniczających ruch pieszych w obszarach, w których pracują wózki widłowe,
- instalację odpowiednich słupków i barierek bezpieczeństwa, zmniejszających ryzyko kolizji,
- stosowanie systemów umożliwiających okresowe rozdzielanie stref pracy pieszych i wózków, systemów ograniczających prędkość jazdy wózków, systemów ostrzegających o pracującym w pobliżu wózku (świetlne, dźwiękowe),
- wyznaczanie okresowo odrębnych obszarów dla pieszych i wózków widłowych, np. podczas kompletacji, uzupełniania miejsc pobrań lub sortowania,
- wykorzystanie tymczasowych barier o wysokiej widoczności,
- wprowadzenie całkowitego zakazu ruchu pieszych w obszarach intensywnej pracy wózków itp.

Drogi transportu wewnętrznego

W obiektach logistycznych i układach transportu wewnętrznego bardzo istotne z punktu widzenia poziomu bezpieczeństwa są drogi transportowe. Powinny one być odpowiednio zaprojektowane i spełniać szereg norm i wymogów. W tym przypadku duże obowiązki nałożono na zarządców obiektów magazynowych. Zgodnie z Rozporządzeniem ministra Pracy i Polityki Socjalnej z 26 września

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy jest on zobowiązany do tego, aby na terenie magazynu (jako miejsca pracy) spełnione były następujące wytyczne [265]:

- drogi komunikacyjne, transportowe, drogi dla pieszych (przejścia) i dojazdy pożarowe wykonane i oznakowane muszą być zgodnie z Polskimi Normami,
- drogi utrzymywane muszą być w stanie niestwarzającym zagrożeń dla użytkowników (równa, twarda lub utwardzona nawierzchnia, odporna na zużycie, nawierzchnia powinna odznaczać się dobrą przyczepnością, nie wytwarzać kurzu przy ruchu pojazdów, być niewsiąkliwa i łatwo zmywalna, dawać się łatwo i szybko naprawiać, dostosowana do obciążenia wykorzystywanych środków transportowych i przemieszczanych ładunków),
- w miejscach, w których możliwe jest wtargnięcie pieszych, w szczególności przed bramami, drzwiami i przejściami należy ustawić barierki lub zastosować inne skuteczne środki ochronne,
- na drogach transportowych i magazynowych nie powinny występować progi ani stopnie (w przypadku zróżnicowania poziomów podłogi, różnice te powinny być wyrównane pochylniami o nachyleniu dostosowanym do rodzaju używanego środka transportu, ale nie większym niż 8%),
- wymiary dróg i przejść muszą być odpowiednie do liczby potencjalnych użytkowników oraz rodzajów i wielkości stosowanych urządzeń transportowych i przemieszczanych ładunków.

Minimalne szerokości dróg na prostych odcinkach ustalone według normy polskiej PN-68, M-78010 przedstawiono w tabeli 4.4.

Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy [265] (paragraf 6 pkt 1) wskazuje dodatkowo, iż miejsca, w których mogą wystąpić potencjalne zagrożenia dla pracowników magazynowych powinny być oznakowane widocznymi barwami lub znakami bezpieczeństwa przeznaczonymi do ostrzegania, instruowania i informowania pracowników o sytuacjach bezpośrednio związanych z bezpieczeństwem i zdrowiem [202] (więcej informacji na ten temat przedstawiono w [43], [203], [209]–[214], [217]).

Znaki bezpieczeństwa stosowane w magazynach powinny być umieszczane [202]:

- przy wejściu, w przypadku ogólnego zagrożenia lub w najbliższym otoczeniu określonego zagrożenia,
- na wysokości linii wzroku,
- w miejscu dobrze oświetlonym, łatwo dostępnym i widocznym.

Prędkość poruszania się środków transportu

Nadmierna prędkość to bardzo częsta przyczyna zajścia w obiektach magazynowych sytuacji niebezpiecznych z udziałem wózków i pieszych. Dopuszczalne

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

prędkości wózków na poszczególnych odcinkach dróg, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy użytkowaniu wózków jezdniowych z napędem silnikowym [262], powinien określić zarządca obiektu magazynowego (pracodawca). Przy tym uwzględnione przez niego powinny zostać takie aspekty, jak m.in.: nasilenie ruchu, rodzaj przewożonych ładunków, szerokość i stan dróg oraz widoczność w magazynie.

Tabela 4.4. Szerokości dróg transportowych zgodnie z PN-68, M-78010

Przeznaczenie drogi		**Minimalna szerokość drogi w cm na odcinkach prostych**	
		Dla bezsilnikowych środków transportowych	**Dla silnikowych środków transportowych**
Ruch 1-kierunkowy	Tylko dla ruchu pieszego z ładunkiem	$b = a + 30$ (jednak nie mniej niż 120)	–
	Tylko dla środków transportowych	$b = a + 60$ (jednak nie mniej niż 120)	$b = a + 60$ (jednak nie mniej niż 120)
	Dla środków transportowych i ruchu pieszego	$b = a + 90$	$b = a + 100$
Ruch 2-kierunkowy	Tylko dla ruchu pieszego z ładunkiem	$b = 2a + 60$	–
	Tylko dla środków transportowych	$b = 2a + 90$	$b = 2a + 90$
	Dla środków transportowych i ruchu pieszego	$b = 2a + 180$	$b = 2a + 200$
b – minimalna szerokość drogi w cm na odcinkach prostych; a – szerokość środka transportowego (gdy ładunek jest szerszy od środka transportowego – szerokość ładunku). Wymiar a powinien odpowiadać największej szerokości w przypadku stosowania różnych środków transportu.			

Źródło: [216].

Niemniej jednak istnieją pewne wytyczne i zalecenia dotyczące maksymalnych dopuszczalnych prędkości (wynikające z badań i doświadczeń), które mogą być wykorzystywane przez pracodawców. Wybrane wytyczne dotyczące sugerowanych prędkości jazdy wózków widłowych przedstawiono poniżej [42], [270]:

- nie należy przekraczać prędkości 18 km/h jadąc na długich, prostych odcinkach poza budynkami (na zewnątrz);
- nie należy przekraczać prędkości 12 km/h jeżdżąc w pobliżu budynków i hal produkcyjnych;

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- nie należy przekraczać prędkości 6 km/h wewnątrz hal magazynowych i produkcyjnych;
- nie należy przekraczać prędkości 3,5 km/h w miejscach o ograniczonej widoczności, przejazdach itd.;
- nie należy przekraczać prędkości 12 km/h jadąc wydzieloną drogą tylko dla wózków i oddzieloną barierami fizycznymi od drogi dla pieszych oraz zachowując odległość równą około czterem długościom wózka od najbliższego wózka;
- nie należy przekraczać prędkości 5 km/h jadąc drogą tylko dla wózków, jednak wydzieloną od drogi dla pieszych jedynie za pomocą linii poziomej na posadzce;
- nie należy przekraczać prędkości 8 km/h podczas dojeżdżania do łuku;
- wózki o średniej wielkości, bez ładunku, podczas pokonywania zakrętów pod kątem 90 stopni nie powinny przekraczać prędkości 8 km/h (przy suchej, poziomej i płaskiej nawierzchni drogi oraz dobrego rodzaju i stanu ogumienia kół wózka);
- wózki o średniej wielkości, bez ładunku, podczas pokonywania zakrętów pod kątem 90 stopni nie powinny przekraczać prędkości 4 km/h (przy suchej, ale niepłaskiej i niepoziomej drodze, mimo dobrego rodzaju i stanu ogumienia kół wózka – jeżeli nierówności przekraczają około 20 mm wysokości, wówczas sugerowane jest zmniejszenia prędkości nawet do 2,5 km/h).

Bezpieczeństwo w procesach kompletacji

W manualnych systemach komisjonowania, czyli takich, w których pracownicy pobierają kompletowane artykuły ręcznie, kluczowym aspektem w zapewnieniu bezpieczeństwa pracowników jest odpowiednie zaprojektowanie i przygotowanie stanowisk pracy oraz odpowiednie ich wyposażenie. Bardzo istotne jest wspomniane już odpowiednie rozmieszczenie artykułów na stanowiskach pracy, tak aby pracownicy byli w stanie je chwycić, unieść i te najcięższe były najbliżej ciała pracowników oraz na wysokościach pomiędzy ich ramionami i kolanami. Poza tym istnieje osiem podstawowych zasad, których przestrzeganie zwiększa bezpieczeństwo pracowników kompletujących manualnie [298]:

- artykuły pobierane i kompletowane bardzo często i w dużych ilościach powinny być pobierane z wykorzystaniem środków mechanicznych,
- odpowiednie rozplanowanie i zaprojektowanie stanowisk pracy, a także wprowadzenie w nich fizycznych zmian i reorganizacja przyniesie większe zmiany na korzyść bezpieczeństwa niż przy pomocy kontroli i zarządzeń administracyjnych,
- najlepsze obszary do lokowania artykułów są pomiędzy ramionami i kolanami kompletującego (*best working zone*),
- artykuły często pobierane i uzupełniane powinny znajdować się w *best working zone*,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- ciężkie artykuły powinny być oferowane w *best working zone*,
- żadne czynności związane z kompletacją nie powinny być wykonywane przez pracownika na wysokości powyżej jego głowy,
- w przypadku kompletacji na wysokości, sprzęt stosowany do podniesienia pracowników musi być specjalnie zaprojektowany do obsługi ludzi oraz musi zapewnić ścisły dostęp do miejsc oferowania asortymentu, a także zapewniać ochronę pracownikowi przed upadkiem z wysokości.

Bardzo często komisjonowanie związane jest z pracą na wysokości. W związku z tym, konieczne jest uwzględnienie dodatkowych procedur operacyjnych, jakie w takich przypadkach powinny być stosowane. Jeżeli na przykład pracownik wykonuje kompletację na wysokości większej niż jeden metr, wykorzystując przy tym wózek do kompletacji dwuwymiarowej, wówczas podczas przemieszczania się wózka wzdłuż korytarza roboczego i pomiędzy miejscami oferowania artykułów, kabina operatora wózka kompletacyjnego powinna zostać opuszczona do wysokości minimum 600 mm. Jest to bardzo istotne, gdyż przemieszczanie się wózkiem z ładunkiem na dużej wysokości może niebezpiecznie zaburzyć stabilność tego urządzenia i doprowadzić do jego wywrócenia. Dodatkowo przed rozpoczęciem podnoszenia platformy z pracownikiem wózek powinien być całkowicie zatrzymany. Wobec tego, aby zapobiec jazdy z podniesioną kabiną operatora – wszystkie wózki kompletacyjne wyposażone są w wyłączniki krańcowe, które uniemożliwiają taką jazdę.

W przypadku kompletacji na wysokości należy również pamiętać o wyposażeniu pracowników w pasy bezpieczeństwa, szelki i barierki przy kabinie, które zabezpieczą pracowników przez upadkiem z wysokości podczas kompletacji. Dodatkowo należy odpowiednio dobrać długość wspomnianych pasów szelek, aby dodatkowo „efektowi wahadła" w przypadku wypadnięcia poza obrys kabiny operatora.

Szkolenia pracowników

Należy pamiętać, iż poziom bezpieczeństwa w obiektach magazynowych i układach transportu wewnętrznego zazwyczaj w znacznym stopniu zależy od ich pracowników. W tym układzie człowiek, a dokładniej jego nieuwaga, niewiedza, brawura itp., jest najczęstszą przyczyną zdarzeń niebezpiecznych. Dlatego właśnie, w celu utrzymania wysokiego poziomu bezpieczeństwa w obiektach logistycznych, ich pracownicy powinni być ciągle szkoleni. Szkolenia te powinny uczyć ich probezpiecznych zachowań, zwiększać ich świadomość potencjalnych zagrożeń, a także zwiększać posiadane przez nich umiejętności i kwalifikacje.

Podstawowymi szkoleniami w jakich powinni uczestniczyć wszyscy pracownicy obiektów magazynowych są szkolenia z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy (więcej na ten temat zawarto w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Socjalnej [265]). Dodatkowo, jeżeli pracownicy magazynowi obsługują różnego

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

rodzaju urządzenia zmechanizowane, takie jak np. wózki widłowe, wówczas muszą oni posiadać odpowiednie uprawnienia. Warunki organizowania kursów do nabywania takich uprawnień dla poszczególnych rodzajów urządzeń reguluje rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie trybu sprawdzania kwalifikacji wymaganych przy obsłudze i konserwacji urządzeń technicznych [263] oraz rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas eksploatacji maszyn i innych urządzeń technicznych do robót ziemnych, budowlanych i drogowych [264].

Reasumując, operatorzy wózków magazynowych muszą przestrzegać wielu zasad i przepisów, aby zmniejszyć ryzyko wypadku i urazów. Poniżej zaprezentowano niektóre z nich [202]:

- w miarę jak to możliwe, zawsze poruszać się wózkiem z maksymalnie opuszczoną kabiną operatora;
- zawsze patrzeć w kierunku jazdy, a jeżeli nie jest to możliwe – poprosić o pomoc,
- zawsze dostosowywać prędkość do warunków jazdy i ruchu, ograniczać prędkość przed skrętem, pamiętając o możliwości „zarzucenia" przodem lub tyłem wózka i wynikającego z tego uszkodzenia znajdującego się w pobliżu przedmiotu, wyposażenia bądź pracownika;
- wjeżdżając w obszar skrzyżowania korytarzy bądź dróg transportu wewnętrznego zwolnić, użyć klaksonu; jeżeli widoczność jest ograniczona, spróbować wjechać w korytarz z drugiej strony;
- niedopuszczalne jest przewożenie wózkiem pasażerów na widłach, ładunku, platformie lub jakiejkolwiek innej części wózka;
- unikać gwałtownych hamowań, skrętów i ruszania, a w szczególności gdy przewozisz ładunek;
- nigdy nie przejeżdżać po napotkanych w magazynie przedmiotach, zawsze zatrzymać wózek, usunąć przeszkodę i dopiero ruszyć dalej;
- należy używać pasów bezpieczeństwa, ograniczeń prędkości i znaków stopu, zachować szczególną ostrożność i unikać skrętu podczas jazdy na pochylniach i pochyłościach;
- przy wysiadaniu z wózka widłowego należy zaciągnąć hamulec postojowy, złożyć widły i zneutralizować elementy sterujące;
- podnoszenie ludzi na widłach lub paletach jest wyjątkowo ryzykowne i jest zabronioną praktyką;
- kabiny wózków do kompletacji dwuwymiarowej muszą mieć barierki zabezpieczające przed upadkiem. Jeśli możliwe jest opuszczenie kabiny, należy założyć szelki bezpieczeństwa. Uprząż musi być mocno zakotwiczona do stabilnego elementu wózka;
- należy podjąć wszelkie kroki, aby zminimalizować ryzyko wystąpienia incydentu, niemniej jednak ważne jest, aby wiedzieć, jak należy się zachować w przypadku zajścia sytuacji niebezpiecznej.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

4.6. OCENA RYZYKA ZAWODOWEGO W OBIEKTACH MAGAZYNOWYCH

4.6.1. RYZYKO, ZAGROŻENIE I BEZPIECZEŃSTWO

W problematyce bezpieczeństwa i nauce o bezpieczeństwie używane są dwa podstawowe pojęcia – *ryzyko i zagrożenie.* Pojęcia te często stosowane są w różnych znaczeniach, niepoprawnie, a nawet zamiennie [282]. Istotne w tym przypadku jest również poprawne rozumienie i wykorzystywanie takich pojęć, jak *zagrożenie*, *zdarzenie niepożądane* czy w końcu *bezpieczeństwo*. Dlatego w niniejszym rozdziale główna uwaga poświęcona zostanie tym właśnie pojęciom.

Ryzyko

Według T. Szopy [278], [279], [280], [282] *ryzyko* należy definiować jako możliwość pojawienia się określonych strat (szkód związanych z człowiekiem) w rozważanym systemie człowiek-technika-otoczenie (C-T-O) podczas określonego czasu jego funkcjonowania.

Bardziej techniczne podejście do określenia ryzyka przedstawiono w [69], gdzie zdefiniowano je jako kombinację prawdopodobieństwa i stopnia obrażeń lub uszczerbku na zdrowiu, które mogą zaistnieć w sytuacjach niebezpiecznych.

W literaturze można również inne podobne podejścia do definiowania ryzyka, np.:

- *Ryzyko* jest kombinacją prawdopodobieństwa lub częstości występowania określonych zagrożeń i wielkości strat, które mogą one spowodować. Wobec tego można traktować je jako miarę prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego i jego skutków;
- *Ryzyko* jest kombinacją częstości lub prawdopodobieństwa wystąpienia określonego zdarzenia niebezpiecznego (które może powodować szkodę) i konsekwencji związanych z tym zdarzeniem (PN-IEC 300-3-9).

Pojęcie ryzyka zazwyczaj wiązane jest z nazwą rodzaju straty do jakiej może ono prowadzić. Wobec tego można wyróżnić np. ryzyko strat ludzkich, ryzyko strat finansowych, ryzyko skażenia środowiska. Jeżeli ryzyko pojawia się na stanowisku pracy i związane jest z pracą zawodową, wówczas mamy do czynienia z ryzykiem zawodowym.

Ryzyko zawodowe może być definiowane jako możliwość utraty życia przez pracownika lub doznanie przez niego określonych ubytków zdrowia w określnym czasie wykonywania zadań na stanowisku pracy, wskutek procesów i zdarzeń niepożądanych, które mogą się na tym stanowisku pojawić. Inne źródła normatywne (np. [255]) wskazują, iż ryzyko zawodowe to prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń związanych z wykonywaną pracą, powodujących straty, w szczególności wystąpienie u pracowników niekorzystnych skutków

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

zdrowotnych w wyniku zagrożeń zawodowych występujących w środowisku pracy lub sposobu wykonywania pracy.

Niezależnie od sposobu definiowania, ryzyko zawodowe wiążą równocześnie dwa elementy: prawdopodobieństwo wystąpienia urazu, choroby lub pogorszenia stanu psychofizycznego wskutek występującego w środowisku pracy zagrożenia oraz ich następstwa. Ryzyko to jest ponoszone przez pracownika w związku z wykonywaną przez niego pracą [133].

Pośród pojęć związanych z ryzykiem wyróżnić należy również ryzyko indywidualne, zbiorowe, całkowite i cząstkowe. W przypadku, gdy ryzyko wiąże się tylko z pojedynczą osobą, wówczas mowa o *ryzyku indywidualnym*. Jeżeli dotyczy ono grupy ludzi, całego przedsiębiorstwa, społeczeństwa, narodu, grupy etnicznej itp. mamy do czynienia z *ryzykiem zbiorowym*.

Pojęcia ryzyka całkowitego i cząstkowego wprowadzane są zazwyczaj na potrzeby modelowania i analizy ryzyka i strat. Według [282] *ryzyko całkowite* uwzględnia możliwość wywołania strat przez każde ze zdarzeń niepożądanych (np. upadek, uderzenie, porażenie prądem, potrącenie itp.) lub czynników szkodliwych, czyli procesów niepożądanych (np. hałas, zapylenie itp.), branych pod uwagę przy opracowywaniu modelu ryzyka. W przeciwieństwie do całkowitego, *ryzyko cząstkowe* wskazuje na możliwość wywołania strat przez określone zdarzenie niepożądane lub niepożądany proces (proces narażenia na dany czynnik szkodliwy lub niebezpieczny). *Szkodliwy czynnik występujący w procesie pracy* w tym wypadku to czynnik, którego oddziaływanie na pracującego prowadzi lub może prowadzić do schorzenia lub urazu [222]. Dodatkowo, *czynnik niebezpieczny w procesie pracy* jest to czynnik którego oddziaływanie na pracującego prowadzi lub może prowadzić do urazu [222].

Zagrożenie i zdarzenie niepożądane

Z przytoczonych powyżej definicji wynika, że ryzyko jest ściśle związane ze zdarzeniami. Określa ono pewne prawdopodobieństwo (możliwość) pojawienia się określonych strat i szkód, wynikających ze zdarzeń niepożądanych, które pomimo iż nie zaistniały, są możliwe. Zdarzenia niepożądane mogą obejmować takie zdarzenia, jak np.: uszkodzenie, niesprawność, błąd człowieka. W literaturze (np. [282]) *zdarzenie niepożądane* definiowane jest jako takie zdarzenia, którego zajście w rozpatrywanym systemie człowiek-technika-otoczenie (C-T-O) wywołuje w efekcie zagrożenie dla chronionych dóbr. Przy czym dobra te w ogólnym przypadku systemu C-T-O rozumiane mogą być jako: zdrowie i życie ludzi, środowisko naturalne, dobra materialne indywidualne i zbiorowe.

W momencie zajścia zdarzenia niepożądanego gwałtownie zwiększa się poziom ryzyka. Ryzyko to, identyfikowane dla określonej sytuacji wywołanej zajściem sytuacji niepożądanej, nazywane jest zagrożeniem. Wobec tego *zagrożenie* może być definiowane jako [282]: możliwość powstania określonych strat, ustalana dla sytuacji powstałej po zajściu pojedynczego zdarzenia niepożądanego

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

w rozpatrywanym systemie C-T-O (człowiek-technika-otoczenie). Poziom zagrożenia jest tym większy, im większa jest możliwość wywołania określonych strat przez zdarzenie niepożądane, które je powoduje. Inne podejście do zagrożenia zaprezentowano w [222], gdzie przez zagrożenie rozumiany jest stan środowiska pracy mogący spowodować wypadek lub chorobę.

W praktyce może występować wiele różnych zagrożeń dla pracowników. W zależności od rodzaju wykonywanej pracy i stanowiska pracy można wyróżnić takie zagrożenia, jak np.: mechaniczne, elektryczne, toksyczne, akustyczne. Jest to podział ze względu na rodzaj czynnika zagrażającego, niemniej jednak można sformułować wiele więcej podobnych klasyfikacji.

Odnosząc się do przytoczonych definicji należy zwrócić szczególną uwagę na prawidłowe zrozumienie trzech pojęć: *zagrożenie*, *stan zagrożenia* i *źródło zagrożenia*. Nie powinny bowiem być one stosowane wymiennie jako synonimy. **Zagrożenie i stan zagrożenia mają miejsce tylko wówczas, gdy dojdzie do pojawienia się zdarzenia niepożądanego**. Wówczas mogą być one jego skutkiem. Jeżeli jednak nie dochodzi do wspomnianego zdarzenia niepożądanego, zagrożenie i stan zagrożenia nie występują, pomimo iż cały czas istnieje źródło zagrożenia (np. maszyna, która może wybuchnąć).

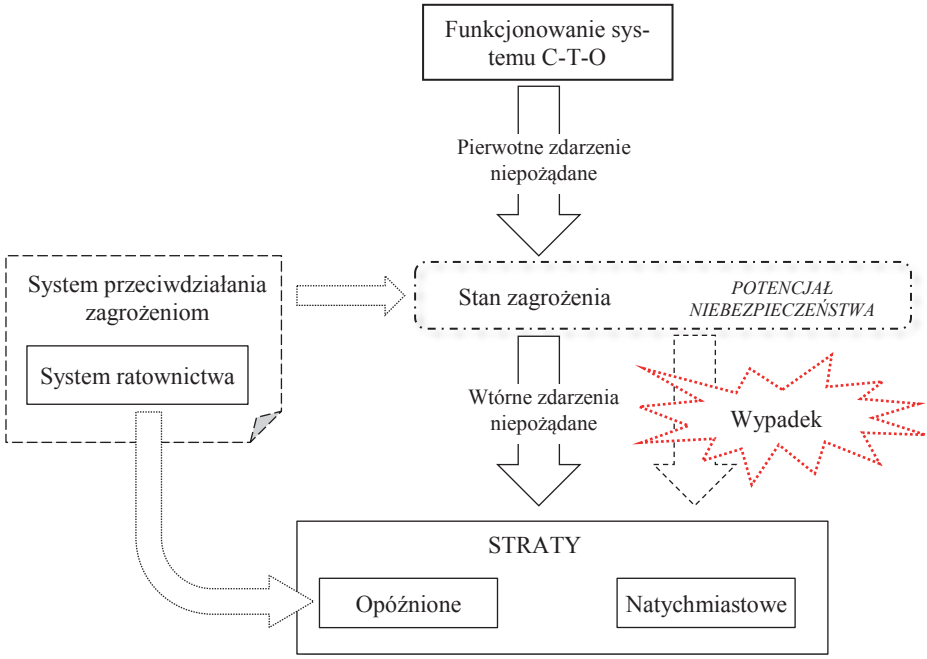
Podczas funkcjonowania każdego systemu C-T-O może zajść *pierwotne zdarzenie niepożądane*. W jego wyniku powstaje stan zagrożenia. Stanowi zagrożenia towarzyszy pewien „potencjał niebezpieczeństwa". On z kolei może doprowadzić (w wyniku jego wyzwolenia) do dalszej sekwencji zdarzeń niepożądanych, tzw. *wtórnych zdarzeń niepożądanych*, które mogą prowadzić do strat w systemie C-T-O. Wobec powyższego, każde pierwotne zdarzenie niepożądane może przyczynić się do powstania sekwencji wtórnych zdarzeń niepożądanych, z których każde kolejne takie zdarzenie zwiększa poziom zagrożenia. Jeżeli proces pojawiania się sekwencji wtórnych zdarzeń niepożądanych zachodzi w sposób nagły i oprócz strat finansowych powstają straty ludzkie (natychmiastowe bądź opóźnione), wówczas proces przejścia ze stanu zagrożenia do strat jest nazywany *wypadkiem* [282] (patrz rys. 4.10).

W celu zmniejszenia zagrożenia po jego pojawieniu w systemie C-T-O stosowane są tzw. systemy przeciwdziałania zagrożeniom. Są to różnego rodzaju zabezpieczenia i systemy zabezpieczeń o charakterze technicznym, jak również w postaci zespołów ludzi. Jednym z elementów systemu przeciwdziałania zagrożeniom jest również system ratownictwa. Jego podstawowym zadaniem jest ograniczanie rozmiaru strat opóźnionych dotyczących ludzi (patrz rys. 4.10).

Bezpieczeństwo

Jednym z najważniejszych pojęć poruszanej tematyki jest pojęcie bezpieczeństwa. Najczęściej bezpieczeństwo definiuje się zarówno jako stan (osiągnięte poczucie bezpieczeństwa danego podmiotu), jak i proces (zapewnianie poczucia bezpieczeństwa podmiotu). Bardziej praktyczne jest podejście drugie, wskazujące na naturalny, dynamiczny charakter zjawiska bezpieczeństwa [159].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 4.10. Proces powstawania strat w systemie C-T-O

Źródło: opracowanie własne na podstawie [282].

W tym sensie *bezpieczeństwo danego podmiotu* to ta dziedzina jego aktywności, której treścią jest zapewnianie możliwości przetrwania (egzystencji) i swobody realizacji własnych interesów w niebezpiecznym środowisku, w szczególności poprzez wykorzystywanie szans (okoliczności sprzyjających), stawianie czoła wyzwaniom, redukowanie ryzyka oraz przeciwdziałanie (zapobieganie i przeciwstawianie się) wszelkiego rodzaju zagrożeniom dla podmiotu i jego interesów [159].

Bardzo często podczas definiowania bezpieczeństwa główna uwaga zwracana jest na fakt, iż do nauki o bezpieczeństwie należy zapobieganie wszelkim stratom. Należy jednak w takim przypadku dokonać pewnego rozróżnienia w pojęciu bezpieczeństwa i wyodrębnienia takich pojęć, jak np. bezpieczeństwo człowieka, bezpieczeństwo obiektu technicznego czy bezpieczeństwo środowiska naturalnego. W niniejszej monografii główna uwaga skupiona zostanie na stratach ludzkich, wobec tego w dalszych rozważaniach autor będzie skupiał się zasadniczo na aspektach bezpieczeństwa człowieka, a pojęcie bezpieczeństwa pracy będzie związane z ochroną życia i zdrowia na stanowisku pracy.

Uwzględniając powyższe, w [282] zaproponowano, iż *bezpieczeństwo* może być definiowane jako pojęcie przeciwne do pojęcia ryzyka strat ludzkich. Wobec tego bezpieczeństwo pracowników jest pojęciem przeciwnym do definiowanego

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

powyżej pojęcia ryzyka zawodowego. Poziom bezpieczeństwa w tym przypadku maleje wraz ze wzrostem ryzyka strat ludzkich i odwrotnie.

Podobnie jak w przypadku ryzyka, jeżeli pojęcie bezpieczeństwa jest odnoszone do pojedynczej osoby, mówimy o *bezpieczeństwie indywidualnym*. W przeciwnym przypadku, jeżeli dotyczy ono grupy ludzi, całego przedsiębiorstwa, społeczeństwa, narodu, grupy etnicznej itp. mamy do czynienia z *bezpieczeństwem zbiorowym*.

4.6.2. MIARY RYZYKA ZAWODOWEGO

Przedstawione w rozdziale 4.6.1 definicje pojęć bezpieczeństwa, ryzyka i zagrożenia wskazują, iż pojęcia te bezpośrednio związane są z możliwością doznania różnego rodzaju strat. Wielkość i rozmiar strat jakich może doznać człowiek lub jakikolwiek inny element z systemu C-T-O powinien być określany przez wielkości matematyczne, które nazywane są *miarami ryzyka*. Wybór określonej miary ryzyka jest niezbędny do tego aby możliwe było przeprowadzenie analizy ryzyka metodą ilościową (niemniej jednak zalecane są one także w przypadku stosowania metod jakościowych). Dobór tego rodzaju miar rzutuje na zasadność i możliwość wykorzystania określonej metody analizy ryzyka i powinien być wykonywany już na etapie jej wyboru. Zapis i charakterystykę miar przedstawioną w niniejszym rozdziale opracowano na podstawie [281].

Jedną z najczęściej wykorzystywanych miar do oceny ryzyka jest $\Lambda(s, t)$, która określa prawdopodobieństwo pojawienia się strat $S(t)$ nie mniejszych niż s w okresie t funkcjonowania rozważanego systemu C-T-O [281]. Formalnie może ona być przedstawiona w postaci:

$$\Lambda(s,t) = P\{S(t) \geq s\} \tag{4.17}$$

Wobec powyższego $S(t)$ jest zmienną losową opisującą wielkość strat jakie mogą zajść w okresie t funkcjonowania analizowanego systemu C-T-O, natomiast s jest wielkością strat niezbędnych do wskazania na potrzeby badań (straty o wymiarze mniejszym niż s nie będą uwzględniane w rozważaniach). Przedstawiona miara w sposób jawny uwzględnia losowość strat oraz ich rozmiar.

Przedstawiona powyżej miara może być wykorzystywana do analizy ryzyka zawodowego. W takim przypadku jako system C-T-O rozumiane będzie stanowisko pracy, a wielkość s będzie traktowana jako wielkość indywidualnych strat ludzkich. Wielkość tych strat jest ustalana w zależności od celu i rodzaju prowadzonych analiz i może być np. utratą życia pracownika, ciężkimi obrażeniami lub urazami powodującymi jego nieobecność w pracy przez określony okres czasu. Jeżeli celem analiz byłoby oszacowanie poziomu ryzyka zbiorowych strat ludzkich, wówczas wielkość s stanowiłaby liczbę ofiar śmiertelnych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Estymatorem miary $\Lambda(s, t)$, tj. jej odpowiednikiem statystycznym, jest wielkość:

$$\hat{\Lambda}(s,t) = \frac{n(s,t)}{N} \tag{4.18}$$

przy czym:

$n(s, t)$ – liczba zdarzeń niepożądanych, jakie zaszły w okresie t w określonej populacji bądź też próbce statystycznej analizowanych systemów C-T-O (np. podobne stanowiska pracy w danej branży czy też przedsiębiorstwie) oraz wywołały straty nie mniejsze niż założona wartość s,

N – liczebność populacji, próbki statystycznej analizowanych systemów C-T-O.

Często dochodzi do sytuacji, gdy straty wynikają jedynie ze zdarzeń jakie zaszły. Wówczas poziom ryzyka szacuje się dla czasu jednostkowego, zakładając przy tym, iż poziom ten będzie się zwiększał (w przybliżeniu) liniowo wraz z upływem czasu. Czasem jednostkowym może być np. 1 rok, miesiąc, tydzień, dzień, godzina lub też umowna jednostka czasu (pojedyncze wykonanie danej czynności lub zadania na stanowisku pracy). W takim przypadku sformułowania (4.15) i (4.16) będą przyjmowały postać:

$$\Lambda(s,1) = P\{S(1) \geq s\} \tag{4.19}$$

$$\hat{\Lambda}(s,1) = \frac{n(s,1)}{N} \tag{4.20}$$

Statystyczne postacie miar ryzyka (4.17) – (4.18) (miary probabilistyczne) wykorzystywane są do obliczeń opartych na danych statystycznych. Niestety, bardzo często badacze dysponują niewielką liczbą takich danych. To może w konsekwencji doprowadzić do tego, iż wykonane szacunki będą miały niewielką dokładność. Wobec tego, w celu zwiększenia tej dokładności niezbędne jest zebranie danych statystycznych w okresie dłuższym niż jednostkowy ($t = 1$). W takim przypadku, wielkość $\Lambda(s, 1)$ powinna być szacowana z wykorzystaniem wzoru (4.19):

$$\hat{\Lambda}(s,1) = \frac{n(s,1)}{N \cdot t} \tag{4.21}$$

Ważnym jest aby pamiętać, że jeżeli analizie poddawane będą długie okresy czasu t lub ryzyko szacowane będzie dla dużych systemów, wówczas $\widehat{\Lambda}(s,1)$ może przyjmować wartości większe niż 1. W takich przypadkach $\widehat{\Lambda}(s,1)$ powinno być traktowane jako częstość występowania strat, a nie ich prawdopodobieństwo.

Miara ryzyka może być również odnoszona do korzyści jakie płyną z funkcjonowania określonego systemu. Często jest ona stosowana na potrzeby porównania systemów, których zasadniczym celem działania jest zaspokajanie tych samych lub podobnych potrzeb (np. przewóz osób, transport ładunków, obsługa logistyczna strumieni materiałów). Wówczas jako miara ryzyka może być wykorzystywana wielkość (4.19), związana z miarą $\Lambda(s, 1)$:

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

$$\breve{\Lambda}(s) = \frac{\Lambda(s,1)}{EF(t)} \tag{4.22}$$

przy czym $EF(t)$ określa korzyści płynące z funkcjonowania systemu w określonym czasie t (np. liczba pasażerokilometrów/rok, liczba jednostek ładunkowych/ /rok, liczna tonokilometrów/rok). Wskazuje to, iż $\breve{\Lambda}(s)$ **może być z powodzeniem stosowane jako miara do oceny ryzyka w obiektach logistycznych, magazynowych, systemach transportowych** itp.

W przypadku bardziej ogólnych analiz ryzyka, do jego oszacowania może być również wykorzystywana miara $s_o(t)$, która odwzorowuje wartość oczekiwaną strat jakie mogą zajść w czasie t:

$$s_o(t) = E[S(t)] \tag{4.23}$$

Miara $s_o(t)$ może być również rozumiana jako najbardziej prawdopodobny rozmiar strat, jakie mogą zajść w czasie funkcjonowania danego systemu – czasie t [281]:

$$s_o(t) = \tilde{S}(t) \tag{4.24}$$

W takiej postaci miara $s_o(t)$ wykorzystywana jest w jednej z popularnych metod oceny ryzyka zawodowego – *Risk Score* – patrz rozdz. 4.6.4, tabela 4.5 [157], [279].

Podobnie jak w przypadku $\breve{\Lambda}(s)$ miarę $s_o(t)$ można odnieść do korzyści płynących z funkcjonowania systemu w czasie t. Wówczas przyjmuje ona postać:

$$\breve{s}_o = \frac{s_o(t)}{EF(t)} \tag{4.25}$$

W przypadku zależności (4.17)–(4.20) założono, że poziom ryzyka zależy głównie od zdarzeń jakie zachodzą w systemie i rośnie liniowo wraz z upływem czasu. Jednak do strat (głównie ludzkich) może również dochodzić w wyniku długotrwałego działania czynników szkodliwych (np. hałasu, zapylenia, środków i oparów toksycznych, promieniowania, pola elektromagnetycznego). Wówczas poziom ryzyka rośnie nieliniowo wraz z upływem czasu. To powoduje, iż w analizach należy uwzględniać całkowity czas narażenia na wspomniane czynniki szkodliwe i nie powinno się miary ryzyka odnosić do czasu jednostkowego. Uwzględniając powyższe, miara ryzyka $\Lambda(s, t)$, może być definiowana jako prawdopodobieństwo pojawienia się strat nie mniejszych niż s wskutek narażenia na działanie określonego czynnika szkodliwego o intensywności B przez okres τ_B, tj.: $\Lambda(s, \tau_B)$. Formalnie prawdopodobieństwo to może być zapisane w postaci:

$$\Lambda(s, \tau_B) = P\{S(\tau_B) \geq s\} \tag{4.26}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W tym przypadku $S(\tau_B)$ może być interpretowane jako stopień utraty zdrowia (np. procentowy ubytek wzroku w wyniku pracy przy monitorze komputerowym, lub słuchu wskutek narażenia na hałas).

Odpowiednikiem statystycznym (estymatorem) miary ryzyka $\Lambda(s, \tau_B)$ jest wielkość $\hat{\Lambda}(s, \tau_B)$:

$$\hat{\Lambda}(s, \tau_I) = \frac{n(s, \tau_B)}{N_{\tau_B}} \tag{4.27}$$

przy czym $n(s, \tau_B)$ określa liczbę osób (spośród $N_{\tau B}$ osób narażonych na działanie czynnika szkodliwego o intensywności B), które utraciły zdrowie w stopniu nie mniejszym niż s w okresie τ_B.

W rozdziale 4.6.1 przedstawiono podstawowe pojęcia dotyczące bezpieczeństwa, ryzyka i zagrożenia. Zwrócono tam szczególną uwagę na fakt, iż są to różne pojęcia i nie należy ich stosować wymiennie. Niemniej jednak występuje pewien związek pomiędzy miarami tych wielkości, co przedstawiono poniżej:

$$M_R = M_{ZAW} \cdot M_{ZAG} \tag{4.28}$$

przy czym:
M_R – oznacza miarę ryzyka,
M_{ZAW} – oznacza miarę zawodności systemu C-T-O,
M_{ZAG} – oznacza miarę zagrożenia,

Powyższa zależność jest poprawna dla każdej z zaprezentowanych w niniejszym rozdziale miar analizy ryzyka. W przypadku pierwszej z nich – $\Lambda(s, t)$ – związek ten może zostać zapisany w postaci [281]:

$$\Lambda(s, t) = Q(t) \cdot Z(s) \tag{4.29}$$

gdzie:
$Q(t)$ – oznacza prawdopodobieństwo (lub częstość) zajścia określonego zdarzenia niepożądanego *ZN* w założonym przedziale czasu *t;*
$Z(s)$ – oznacza prawdopodobieństwo tego, iż zajście zdarzenia niepożądanego *ZN* spowoduje straty większe bądź równe założonej wielkości strat *s*.

Prawdopodobieństwo $Z(s)$ zgodnie z definicją zagrożenia, przedstawioną w rozdziale 4.6.1, może zostać uznane za jedną z *miar zagrożenia*, które powstawało w wyniku zajścia zdarzenia *ZN*. Jej zapis matematyczny będzie postaci:

$$Z(s) = P\{\ddot{s} \geq s \mid ZN\} \tag{4.30}$$

gdzie $\ddot{s}$ oznacza wielkość (rozmiar) strat spowodowanych zajściem zdarzenia *ZN*.

Wobec tego *miarą zawodności* analizowanego systemu (patrz wzory 4.21 – 4.22) może być nazywane prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia niepożądanego w czasie *t*, tj. $Q(t)$, które jest równe:

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

$$Q(t) = 1 - R(t) \tag{4.31}$$

przy czym $R(t)$ oznacza prawdopodobieństwo tego, że w czasie t nie zajdzie zdarzenie niepożądane *ZN* i jest nazywane *funkcją niezawodności.*

Kolejną omawianą miarą ryzyka była $s_o(t)$. W jej przypadku związek zaprezentowany jako wyrażenie (4.21) będzie postaci:

$$s_o(t) = Q(t) \cdot Z_o \tag{4.32}$$

przy czym Z_o oznacza oczekiwaną wartość strat wynikających z zajścia zdarzenia niepożądane *ZN*.

Przedstawione powyżej zależności jednoznacznie wskazują, iż na bezpieczeństwo w systemach C-T-O wpływają zarówno czynniki związane z niezawodnością tego systemu (i/lub jego elementów), jak i czynniki związane z zagrożeniami wywołanymi przez zdarzenia niepożądane. Wobec tego realizowane dla nich analizy dotyczące ryzyka i bezpieczeństwa nie powinny ograniczać się jedynie do analiz związanych z zagrożeniami albo zawodnością. W prowadzonych badaniach powinny one być uwzględniane jednocześnie.

4.6.3. ALGORYTM ANALIZY I OCENY RYZYKA ZAWODOWEGO

Istnieje wiele różnych metod, które stosowane są do oceny ryzyka zawodowego. Niemniej jednak ogólne wytyczne dotyczące zasad i metod oceny ryzyka zawodowego przedstawiają polskie normy, m.in. norma PN-N-18002:2000 [237], która zawiera ogólne zasady i kryteria oceny ryzyka oraz sugeruje dwie zasadnicze metody oceny ryzyka – ilościową i jakościową.

Ze względu na poruszaną w monografii tematykę główna uwaga zwrócona zostanie na ryzyko związane z pracą w obiektach magazynowych. To zasadniczo sugeruje, iż w tym przypadku należy się skupić na ryzyku związanym z użytkowaniem maszyn oraz ryzyku występującym w systemach technicznych. Zasady oceny ryzyka w bezpieczeństwie maszyn wskazuje norma PN-EN 1050:1999 [235]. Przedstawione w niej są takie metody analizy ryzyka, jak np.: PHA, WI, FMEA, FTA. Zasady analizy ryzyka w systemach technicznych uwzględnione zostały w normie PN-IEC 60300-3- 9:1999 [236], która uwzględnia takie metody analizy ryzyka, jak np. HAZOP, FMEA, FTA, ETA, PHA, HRA.

Szczegółowe wytyczne dotyczące zasad i metod oceny ryzyka zawodowego można odnaleźć w bogatej w tym obszarze literaturze, np.:

- dokumentacja oceny ryzyka: [32], [256];
- czynniki szkodliwe dla zdrowia: [14], [286];
- analiza zagrożeń i zasady oceny ryzyka: [153], [160], [257], [307];
- metody i kryteria oceny ryzyka: [104], [134], [160], [192], [191], [200], [234], [257].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Na potrzeby prawidłowego przeprowadzenia oceny ryzyka należy przygotować w porozumieniu z pracownikami/lub ich przedstawicielami plan działań odnoszących się do oceny ryzyka zawodowego, a następnie go udokumentować. Takie działanie powinno zapewnić przeprowadzenie oceny w sposób systematyczny, uwzględniając przy tym wszystkie aspekty pracy i wszystkie zagrożenia występujące w miejscu pracy. Opracowany w ten sposób plan powinien uwzględniać [222], [237]:

- wyznaczenie osób odpowiedzialnych za planowanie i koordynowanie działań związanych z oceną ryzyka zawodowego,
- wyznaczenie i szkolenie odpowiednich osób do jej przeprowadzenia,
- zaangażowanie kierownictwa i pracowników w ocenę ryzyka zawodowego,
- zapewnienie osobom prowadzącym ocenę dostępu do odpowiednich informacji i zasobów,
- planowanie i realizację wynikających z oceny działań zapobiegawczych i korygujących,
- monitorowanie stosowanych środków ochrony w celu zapewnienia, że są one przez cały czas skuteczne,
- dokumentowanie oceny ryzyka zawodowego,
- informowanie pracowników o wynikach oceny ryzyka zawodowego i realizowanie działań zapobiegawczych i korygujących,
- przegląd i kontrole wyników oceny ryzyka zawodowego oraz jej weryfikacje.

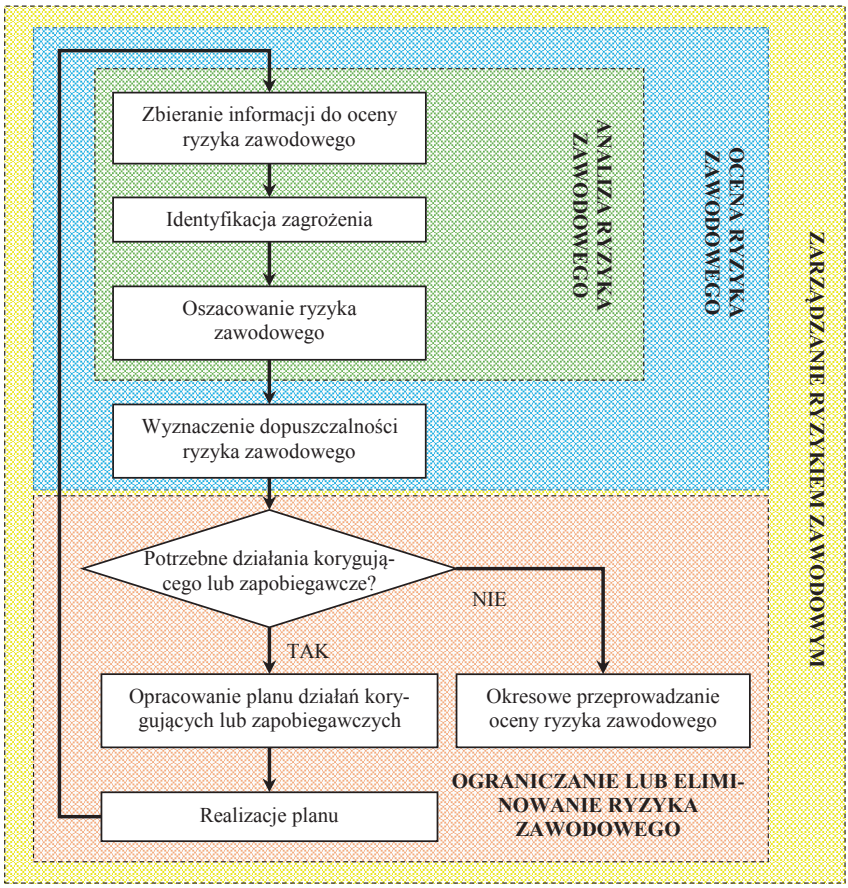
Ocenę ryzyka powinno się wykonywać dla wszystkich stanowisk i obszarów pracy (zarówno stacjonarnych, jak i niestacjonarnych). W przypadku, gdy na wielu stanowiskach wykonuje się te same, albo bardzo podobne czynności, wówczas można je zgrupować i przeprowadzić analizę dla grupy.

Algorytm postępowania w celu dokonania oceny/analizy ryzyka zawodowego przedstawiono na rys. 4.11. Pierwszym wskazanym tam krokiem jaki należy wykonać jest zebranie wszystkich informacji potrzebnych do oceny ryzyka zawodowego. Są to informacje dotyczące głównie [222]:

- lokalizacji stanowiska pracy oraz realizowanych na nim zadań,
- osób pracujących na stanowisku, z uwzględnieniem osób szczególnie podatnych na oddziaływanie zagrożeń takich, jak: kobiety w ciąży, młodociani, osoby starsze, niepełnosprawne, dla których często celowe jest ustalenie szczególnych kryteriów dopuszczalności ryzyka zawodowego,
- stosowanych środków pracy, materiałów i wykonywanych operacji technologicznych,
- wykonywanych zadań, czynności oraz sposobu i czasu ich wykonywania przez pracujące na stanowisku osoby z uwzględnieniem zadań nieprodukcyjnych,
- wymagań przepisów prawnych i norm odnoszących się do analizowanego stanowiska,
- zagrożeń, które już zostały zidentyfikowane i ich źródeł,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- zagrożeń zewnętrznych mogących negatywnie wpłynąć na zdrowie i bezpieczeństwo pracowników,
- możliwych skutków występujących zagrożeń,
- stosowanych środków ochrony,
- wypadków przy pracy oraz zdarzeń potencjalnie wypadkowych,
- chorób zawodowych oraz innych dolegliwości zdrowotnych występujących na analizowanych i podobnych stanowiskach pracy,
- działań osób niezatrudnionych na ocenianym stanowisku, które mogą powodować dodatkowe zagrożenia,
- psychospołecznego środowiska pracy,
- zmian (w tym zmian przejściowych) i ich wpływ na procesy, materiały, środowisko pracy.



Rys. 4.11. Algorytm analizy ryzyka zawodowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [157], [237].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W kolejnym kroku należy dokonać identyfikacji zagrożeń dotyczących analizowanego stanowiska pracy (bądź grupy stanowisk). W tym przypadku zalecane jest, aby stosować jak najprostsze metody, jak np. listy kontrolne, jednak w przypadku złożonych operacji wykonywanych na stanowisku pracy nie powinno się ograniczać tylko do nich. Wówczas należy wykorzystywać bardziej rozbudowane metody, ale również korzystać z dotychczasowej wiedzy, sprawdzając czy na danym stanowisku nie pojawiają się nowe czynniki.

Podstawowa klasyfikacja zagrożeń jakie mogą mieć miejsce na stanowisku pracy przedstawiono w polskiej normie PN-80/Z-08052 i należą do nich takie zagrożenia, jak [215]:

- fizyczne – poruszające się maszyny lub mechanizmy, ruchome elementy urządzeń technicznych, przemieszczające się wyroby, półwyroby, materiały, obrywanie się mas i brył skalnych ze stropu lub ociosu, tąpnięcia, powierzchnie, na których możliwy jest upadek pracujących, ostrza, ostre krawędzie, wystające elementy, chropowatość i szerokość wyrobów, urządzeń i narzędzi, temperatura powierzchni wyposażenia technicznego i materiałów, położenie stanowiska pracy w stosunku do powierzchni, ziemi lub podłogi pomieszczenia, nieważkość, ciśnienie, hałas, wibracja, ultradźwięki, infradźwięki, temperatura powietrza, wilgotność powietrza, ruch powietrza, jonizacja powietrza, oświetlenie, promieniowanie jonizujące, laserowe, nadfioletowe, podczerwone, pole elektromagnetyczne i elektrostatyczne, elektryczność statyczna, napięcie w obwodzie elektrycznym, pył przemysłowy, aerozole stałe i ciekłe;

- chemiczne:
  a) ze względu na rodzaj działania na organizm:
     - toksyczne,
     - drażniące,
     - uczulające,
     - rakotwórcze,
     - mutagenne,
     - upośledzające funkcje rozrodcze,
  b) w zależności od sposobu wchłaniania:
     - przez drogi oddechowe,
     - przez skórę i błony śluzowe,
     - przez przewód pokarmowy;

- biologiczne:
  a) mikroorganizmy (bakterie, wirusy, grzyby, pierwotniaki i substancje),
  b) wytwarzane przez nie (toksyny, alergeny),
  c) makroorganizmy (rośliny, zwierzęta);

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- psychofizyczne:
  a) obciążenie fizyczne:
     - statyczne,
     - dynamiczne,
  b) obciążenie nerwowo-psychiczne:
     - obciążenie umysłu,
     - niedociążenie lub przeciążenie percepcyjne.

Przeprowadzenie identyfikacji zagrożeń na stanowisku pracy umożliwia realizację kolejnego etapu analizy, czyli oszacowanie ryzyka zawodowego związanego z każdym zidentyfikowanym zagrożeniem. Najogólniej rzecz ujmując, polega to na ustaleniu:
- prawdopodobieństwa wystąpienia niekorzystnych dla zdrowia i życia zagrożeń,
- ciężkości ich następstw, czyli skutków i strat powstałych w ich wyniku.

Najczęściej ryzyko definiowane jest jako iloczyn obu powyższych wielkości (patrz rozdział 4.6.1). W tym przypadku do oszacowania ryzyka (o ile nie jest to niezbędne) zalecane jest wykorzystywanie metod, których stosowanie nie wymaga szerokiej wiedzy eksperckiej i które mogą być w łatwy sposób wykorzystywane do wyznaczania dopuszczalności ryzyka zawodowego oraz właściwego zaplanowania działań korygujących i zapobiegawczych [222].

Na etapie szacowania ryzyka zawodowego kończy się zasadnicza część analizy. Niemniej jednak należy na podstawie uzyskanych wyników dokonać oceny ryzyka. Oznacza to, iż wymagane jest wyznaczenie dopuszczalności ryzyka zawodowego. Kryteria dopuszczalności ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na czynniki szkodliwe dla zdrowia określone są przepisem rozporządzenia w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia. Nieakceptowane jest ryzyko związane z narażeniem na czynniki szkodliwe o stężeniu lub natężeniu przekraczającym ustalone wartości. Sytuacja trudniejsza jest w przypadku ustalania kryteriów akceptowania ryzyka wypadkowego. Wówczas ryzyko takie jest oceniane w sposób względny i właściwie kryteria dopuszczalności ryzyka muszą być ustalone przez zespół prowadzący ocenę ryzyka.

Jeżeli w wyniku przeprowadzonej oceny okaże się, iż niezbędne są wdrożenia dodatkowych działań korygujących, zmniejszających ryzyko, należy zaproponować i wdrożyć plan zmian, a następnie ponownie dokonać analizy i oceny ryzyka na stanowisku pracy ze względu na zidentyfikowane zagrożenia. W przypadku pozytywnej oceny ryzyka należy pamiętać o konieczności okresowej oceny ryzyka i monitorowaniu skuteczności stosowanych środków ochronnych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

4.6.4. METODY OCENY RYZYKA ZAWODOWEGO

Wybór metody szacowania i analizy ryzyka zależy od przedmiotu oceny. W przypadku miejsc pracy, gdzie zagrożenia są dobrze znane i łatwe do zidentyfikowania ocena może być prosta i opierać się na osądach i oszacowaniu. W innych przypadkach należy dokonać pomiarów czynników szkodliwych w środowisku pracy [222].

Wszystkie metody szacowania i analizy ryzyka można podzielić ze względu na kryterium dotyczące sposobu opisu dostępnych danych i informacji. W przypadku podziału na metody *jakościowe* i *ilościowe* kryterium szczegółowym może być dostęp do danych statystycznych, a w przypadku podziału na metody *dedukcyjne* i *indukcyjne* – zastosowanie praw logiki [161].

Metody jakościowe wykorzystywane są do jakościowej analizy faktów, zjawisk i procesów. Cele analizy wyrażane są wówczas opisowo za pomocą określeń słownych. Badania realizowane z wykorzystaniem tego typu metod charakteryzują się podejściem systemowym. Pozwala to na całościową charakterystykę badanych zjawisk, określenie granic systemu, struktury systemu, zbioru elementów i relacji zachodzących między nimi. Metody jakościowe zazwyczaj stosowane są do porównywania poziomów ryzyka (jakościowych) w różnych systemach i ewentualnego poszukiwania sposobów jego zmniejszenia. Jednak należy pamiętać, iż nie nadają się one do szacowania ryzyka i bardziej szczegółowych analiz. Przykładem metod jakościowych mogą być np. listy kontrolne i analiza „co jeśli" (*What-if*), a także *graf ryzyka*, *wskaźnik ryzyka – RiskScore*, *Pięć Kroków* (ang. *Five steps to risk assessment*).

Metody ilościowe służą do ilościowej analizy faktów, zjawisk i procesów, w której cele są wyrażane za pomocą wartości liczbowych w odpowiednich jednostkach miary. Badania koncentrują uwagę na podejściu statystycznym, dzięki czemu możliwe jest liczbowe scharakteryzowanie badanych zjawisk, ocena wiarygodności wyników, a także dobór odpowiednich miar i wskaźników (przykład ich wykorzystania przedstawiono w [282]). Bardzo często metody ilościowe wchodzą również w skład metod probabilistycznych. Mogą one mieć różny stopień złożoności, zależny od stopnia ich szczegółowości, a także od rodzaju analizowanego (ocenianego) systemu C-T-O. Zazwyczaj wykorzystywane są do analiz ryzyka, zwłaszcza analiz prognostycznych.

Kolejną grupą metod oceny ryzyka zawodowego są *metody dedukcyjne*. Wykorzystują one zasadę prowadzenia badań – „od ogółu do szczegółu". Oznacza to, iż podczas badań prowadzone są analizy umożliwiające odtworzenia różnego rodzaju uwarunkowań oraz przyczyn, które doprowadziły do określonych wyników i zdarzeń. Jest to tzw. *podejście retrospektywne* do prowadzenia badań. Przykładem zastosowania metod dedukcyjnych może być m.in. analiza wypadków przy pracy, a przykładem metody dedukcyjnej – analiza drzewa błędów FTA [162].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Przeciwne, w stosunku do metod dedukcyjnych, podejście do prowadzenia badań wykorzystywane jest w przypadku metod indukcyjnych. Stosowana w nich jest bowiem zasada „od szczegółu do ogółu", czyli prospektywne podejście. Na podstawie analiz i obserwacji pojedynczych zdarzeń, a także weryfikacji szczegółowych hipotez wyciągane są wnioski ogólne. W ten sposób możliwe jest wykrycie uwarunkowań i przyczyn, które w efekcie mogą doprowadzić do określonych zdarzeń czy też sytuacji. Przykładem metody indukcyjnej jest analiza drzewa zdarzeń ETA [162].

W poszczególnych, omówionych powyżej grupach metod (ilościowych, jakościowych, indukcyjnych i dedukcyjnych), można wyróżnić wiele różnych metod wykorzystywanych do oceny ryzyka, m.in. [11]:

- zagrożeń i zdolności operacyjnych (*Hazard and Operability Studies* – **HAZOP**),
- przyczyn i skutków (*Failure Mode and Effects Analysis* – **FMEA**),
- *what if* – co jeśli,
- bezpieczeństwa procesu (*Process Safety Analysis* – **PSA**),
- drzewa błędu (*Fault Tree Analysis* – **FTA**),
- drzewa zdarzeń (*Event Tree Analysis* – **ETA**),
- przyczyn i skutków – stanowiąca kombinację metod **FTA** i **ETA** (*Cause and Consequence Analysis* – **CCA**),
- niezawodności ludzkiej (*Human Reliability Analysis* – **HRA**),
- listy kontrolne (*Check List* – **CHL**).

Ogólna ocena najczęściej stosowanych metod oceny ryzyka przedstawiona została w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Ocena najczęściej wykorzystywanych metod oceny ryzyka

Rodzaj metody	Nazwa metody	Krótki opis	Ocena metody
Metody zaawansowane (burzy mózgów)	**HAZOP** Analiza zagrożeń i zdolności operacyjnych	Systematyczna analiza działania układu dla wykrycia i podkreślenia zagrożeń (w szczególności odchyleń od założonego przebiegu procesu), którym mogą towarzyszyć bardzo duże konsekwencje	Metoda trudna, służąca do analizy zagrożeń
	WHAT IF *Co jeśli?*	Przy każdym kroku – *co jeśli?* – formułowane są pytania i udzielane odpowiedzi w celu oceny wpływu uszkodzeń elementu maszyny lub błędów proceduralnych na powstanie zagrożeń związanych z maszyną lub utrzymaniem ruchu	Metoda prosta, służąca do identyfikacji zagrożeń

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rodzaj metody	Nazwa metody	Krótki opis	Ocena metody
Metody zaawansowane (burzy mózgów)	**FMEA** Analiza rodzajów i skutków niezdatności	Analiza działania układu do wykrycia i określenia zagrożeń i ustalenia przyczyn uszkodzeń oraz skutków ich występowania	Metoda nieskomplikowana, wyjątkowo rozbudowana tabela „skutków zdarzeń" (10 pozycji) co zwiększa poprawność oceny
	PHA Preliminaty Hazard Analysis	Sporządzenie listy zagrożeń lub sytuacji niebezpiecznych związanych z daną czynnością lub systemem	Prosta, skuteczna metoda umożliwiająca ocenę ryzyka. Tabele zbyt uproszczone
Metody zaawansowane drzew logicznych	**FTA** analiza drzewa niezdatności	Celem modeli logicznych jest identyfikacja specyficznych związków pomiędzy przyczynami a kombinacją zdarzeń, które mogą mieć wpływ na stworzenie sytuacji grożącej wypadkiem. Metody drzew logicznych wymagają szeregu czasami bardzo szczegółowych informacji i pozwalają na prowadzenie wręcz drobiazgowej analizy scenariuszy	Metoda bardzo skomplikowana, niedająca prostej, jednoznacznej odpowiedzi
	ETA analiza drzewa zdarzeń		
	HRA analiza niezawodności człowieka		
Metody list kontrolnych	**Check List Analysis**	Użycie przez analityka odpowiednio przygotowanego kwestionariusza (bądź kilku kwestionariuszy) dzięki któremu jest w stanie odpowiedzieć na pytania identyfikujące znane rodzaje zagrożeń i potencjalnie niebezpieczne sytuacje związane ze stosowanymi procesami i operacjami	Metoda prosta, służy do identyfikacji zagrożeń. Prosta w zastosowaniu
Metody uproszczone	**Standardowa ocena ryzyka zawodowego**	Metoda oparta na prostej zależności ryzyka w funkcji prawdopodobieństwa i strat	Prosta, skuteczna metoda dająca możliwość oceny ryzyka. Tabele prawdopodobieństwa i strat zbyt uproszczone (skala 3-stopniowa)
	Graf ryzyka	Metoda wykorzystująca 3 czynniki dające na podstawie odczytu graficznego poziom zagrożenia	Prosta metoda umożliwiająca ocenę ryzyka zawodowego. Tabele prawdopodobieństwa 5-stopniowe, konsekwencji (strat) skala 4-stopniowa

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rodzaj metody	Nazwa metody	Krótki opis	Ocena metody
Metody uproszczone	**Risk Score**	Metoda wykorzystująca 3 czynniki, którym jest m.in. ekspozycja na zagrożenie szczególnie ważna dla poszczególnych grup ocenianych	Metoda prosta. Tabele prawdopodobieństwa 6-stopniowe, strat skala 6-stopniowa, ekspozycji 6-stopniowa
	Na podstawie normy **MIL STD 882**	Metoda wykorzystująca w sposobie wyznaczania liczbę cykli szczególnie wskazanych przy produkcji seryjnej. Wskaźnik ryzyka może mieć postać liczbową lub być zestawieniem liczby i litery	Metoda stosunkowo prosta, ale możliwa do stosowania głównie przy produkcji seryjnej (np. fabryka samochodów).
	Na podstawie normy **BS 8800**	Metoda oparta na prostej zależności ryzyka w funkcji prawdopodobieństwa i ciężkości następstw	Metoda bardzo prosta. Tabele prawdopodobieństwa 3-stopniowe, ciężkości następstw 3-stopniowe – zbyt uproszczone
	Na podstawie normy **PN-IEC 60300-3-9**	Norma podaje zakres sposobu zarządzania ryzykiem, a nie oceny ryzyka, która to ocena jest składową procesu.	Nie podano konkretnego sposobu lecz procedurę działania
	Pięciu kroków	Metoda opisująca sposób analizy ryzyka bez podania konkretnej metody oceny ryzyka	Metoda zbyt prosta
	Matryca ryzyka	Metoda zakłada możliwość powstania wypadku i szacuje jakościowo możliwe skutki wypadku w tym możliwą utratę zdrowia. Można nią szacować ryzyko po zastosowaniu zaproponowanych środków ochronnych. Wykorzystuje dwa czynniki do określenia ryzyka	Metoda bardzo prosta. Tabele prawdopodobieństwa 6-stopniowe, ciężkości następstw 4-stopniowe – zbyt uproszczone
	Wskaźnik Ryzyka WPR	W definicji ryzyka prawdopodobieństwo skutków zdarzenia jest uszczegółowione i przedstawione przez cztery parametry ryzyka, tj. prawdopodobieństwo zdarzenia, częstość występowania narażenia, rodzaj szkód, zakres szkód.	Metoda prosta i skuteczna. Zawiera 4 czynniki składające się na ryzyko
	Analiza Bezpieczeństwa Pracy – JSA	W definicji ryzyka prawdopodobieństwo konsekwencji (skutków) zdarzenia jest uszczegółowione i przedstawione przez trzy parametry ryzyka, tj. częstotliwość występowania zagrożeń, możliwość uniknięcia lub ograniczenia szkody i prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia.	Metoda prosta i skuteczna. Zawiera 3 czynniki składające się na ryzyko
	Na podstawie normy **PN-N--18002:2000**	Opiera definiowanie ryzyka na jedynie 2 czynnikach	Metoda prosta zawierająca prawdopodobieństwo i następstwa w 3 lub 5-stopniowej skali

Źródło: [11], [237].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

5 MODEL OBIEKTU I PROCESU MAGAZYNOWEGO

5.1. UWAGI OGÓLNE

Na potrzeby odwzorowania procesów logistycznych zachodzących w obiektach magazynowych niezbędne jest opracowanie modelu tegoż obiektu. Jest on otoczeniem, w którym proces jest realizowany, a elementy, wyposażenie czy zasoby pracy należące do obiektu są nierozerwalnie związane z procesem magazynowym. Bez ich udziału proces nie mógłby być wykonywany. Dodatkowo, typ, rodzaj i funkcje obiektu magazynowego determinują zadania jakie powinien realizować proces magazynowy (zadanie logistyczne).

Model obiektu magazynowego na potrzeby oceny zachodzących w nim procesów ze względu na ich wydajność i bezpieczeństwo pracowników powinien m.in. [128]:

- odwzorowywać rzeczywisty obiekt magazynowy, a zatem być adekwatny w zakresie podobieństwa funkcjonalnego,
- być obiektem zorientowanym na realizację celu wynikającego z pełnionych funkcji,
- umożliwić na podstawie informacji uzyskanych z modelu, oszacowanie stanu badanego procesu logistycznego (magazynowego).

Na potrzeby realizacji procesów logistycznych w obiektach magazynowych niezbędne jest przy tym odwzorowanie w modelu obiektu takich elementów, jak [145]:

- strumienie materiałów i informacji obsługiwanych przez obiekt magazynowy (dostarczanych i wysyłanych z magazynu, a także przetwarzanych w jego obszarze),
- strefy funkcjonalne (przestrzenie/obszary, w których realizowane są procesy),
- elementy stałe: regały zawierające miejsca oferowania i składowania asortymentu, korytarze międzyregałowe stanowiące drogi transportowe, stanowiska kompletacji i kontroli formowanych jednostek ładunkowych, punkty rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych procesów i czynności itp.,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- środki i urządzenia transportu wewnętrznego takie, jak: wózki magazynowe, wózki kompletacyjne, układnice regałowe (urządzenia AS/RS), przenośniki, sortery, podajniki, paletyzatory, foliarki itp. [246], [247],
- urządzenia wspomagające przepływ i przekształcanie strumieni informacji (urządzenia ADIC[1], komputery, skanery kodów kreskowych, komputery, drukarki, itp.),
- zasoby ludzkie i ich charakterystyki,
- podsystemy organizacyjne zapewniające prawidłowe wykorzystanie wyposażenia mechanicznego, elementów stałych, środków sterowania,
- system informacyjny (w tym systemy zarządzania pracą obiektu magazynowego).

Wobec powyższego, na potrzeby opracowania modelu procesów logistycznych zachodzących w obiektach magazynowych niezbędna jest [145]:
- identyfikacja parametrów elementów obiektu magazynowego mających wpływ na realizowane w nim procesy,
- ustalenie parametrów jednostek logistycznych obsługiwanych przez obiekt oraz zakresu zmian ich właściwości,
- określenie sposobu oceny funkcjonowania obiektu magazynowego (przebiegu zachodzących w nim procesów),
- ustalenie warunków brzegowych realizacji zadań logistycznych przez magazyn i zachodzące w nim procesy (ograniczeń determinujących poprawność realizowanych procesów magazynowych),
- określenie kryteriów oceny procesu magazynowego (w przypadku niniejszej monografii główną uwagę zwrócono na wydajność procesów i bezpieczeństwo pracy),
- ustalenie dokładności uzyskiwanych wyników

Biorąc pod uwagę specyfikę procesów logistycznych w obiektach magazynowych (np. losowość, dynamika), ich modele powinny obejmować:
- zmienny charakter struktury jakościowej i ilościowej strumieni materiałów i informacji na wejściu (dostawy) i na wyjściu (wysyłka) z obiektu magazynowego,
- upływ czasu,
- konieczność przydziału zasobów (pracownicy i urządzenia) do zadań w czasie.

Uwzględniając przedstawione powyżej główne wymogi dotyczące modelowania procesów magazynowych, model takiego procesu w postaci ogólnej może zostać zapisany jako uporządkowana siódemka (patrz wzór (5.1). Model nazywany dalej ***Modelem Procesu Magazynowego*** (***MPM***) będzie zapisywany formalnie jako:

$$\boldsymbol{MPM} = \langle \boldsymbol{G}, \boldsymbol{SDW}, \boldsymbol{STW}, \boldsymbol{ZPL}, \boldsymbol{CH}, \boldsymbol{OP}, \boldsymbol{WSO} \rangle \tag{5.1}$$

[1] ADIC (z ang.) *Automated Data Identification and Capture.*

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

przy czym:

G – odwzorowuje strukturę przestrzenną obiektu magazynowego,

SDW – odwzorowuje strukturę strumieni ładunkowych i towarzyszących im informacji obsługiwanych przez obiekt i przetwarzanych przez zachodzące w nim procesy logistyczne,

STW – odwzorowuje strukturę (typy, rodzaje i liczbę) środków transportu wewnętrznego wykorzystywanych do realizacji procesów logistycznych w obiekcie magazynowym,

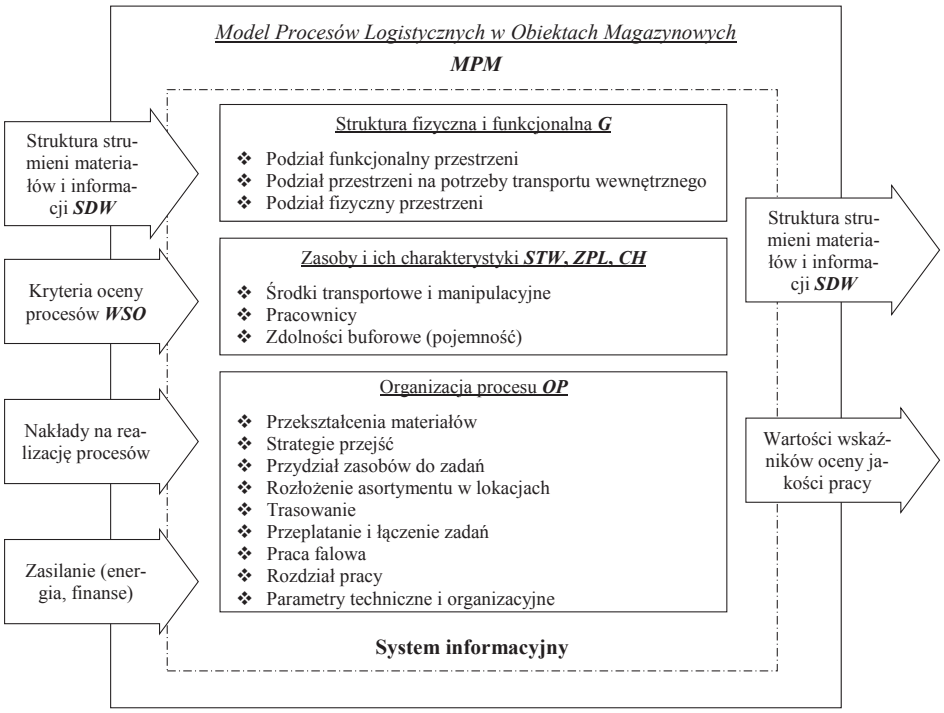
ZPL – odwzorowuje strukturę zasobów ludzkich wykorzystywanych w procesach logistycznych,

CH – odwzorowuje charakterystyki elementów struktury obiektu magazynowego,

OP – odwzorowuje organizację, sposób realizacji procesów logistycznych,

WSO – odwzorowuje zestaw wskaźników oceny procesów logistycznych.

Sformułowany w powyższy sposób model został zaprezentowany graficznie na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Graficzna prezentacja elementów modelu ***MPM***

Źródło: opracowanie własne.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Model w takiej postaci może i powinien być dalej uszczegóławiany zgodnie z przyjętym celem i zakresem badań.

Ze względu na wspomnianą specyfikę procesów, niezbędne jest w ich modelach odwzorowanie upływu czasu. W tym celu wszelkie relacje czasowe w modelu opisane będą na zbiorze numerów odcinków czasowych (lub chwil) $\boldsymbol{T} = \{1, \ldots, t, \ldots, T\}$. W przypadku, gdy jako t definiowany będzie numer odcinka czasu, wówczas T będzie obejmował dobowy czas pracy obiektu magazynowego lub inny wskazany przez badacza okres. Jeżeli jako t rozumiany będzie numer chwili, wówczas jako T oznaczona zostanie ostatnia chwila jaka wystąpiła w okresie analizy modelowanego procesu magazynowego.

5.2. STRUKTURA OBIEKTU MAGAZYNOWEGO

W zależności od realizowanych funkcji i zadań obiekty magazynowe mogą charakteryzować się różną strukturą przestrzenną i organizacyjną. Dodatkowo, w każdej z nich wyizolować można wiele różnorodnych elementów. Niemniej jednak na potrzeby modelowania procesów logistycznych w obiektach magazynowych niezbędne jest opracowanie nowej lub przyjęcie do dalszych prac już istniejącej metodyki klasyfikacji tych elementów.

W większości przypadków przestrzeń obiektów magazynowych dzielona jest ze względu na realizowane w jej obrębie procesy i zadania, a także zastosowaną technologię (głównie technologię składowania i transportu wewnętrznego). Jedną z uniwersalnych metod hierarchicznej klasyfikacji elementów struktury obiektów magazynowych jest metoda przedstawiona w [174]; wyróżnione w tej strukturze są kolejno (patrz rys. 5.2):

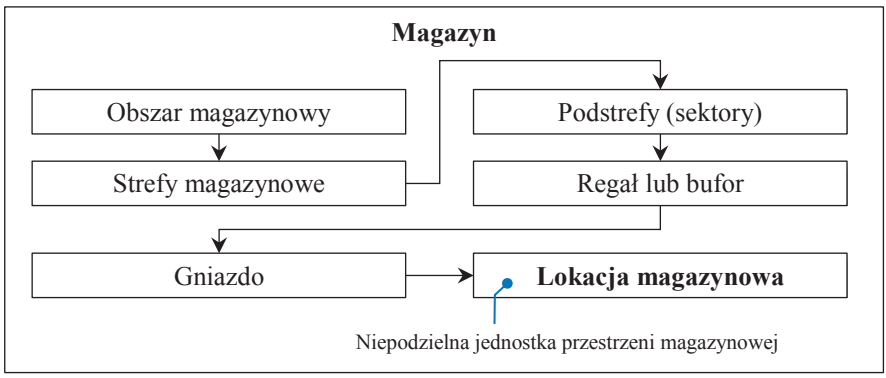
- Jednostka logistyczna zawierająca określony rodzaj asortymentu *ra*-tego typu; niepodzielna porcja określonego *ra*-tego rodzaju asortymentu.
- Lokacja (adres): podstawowa jednostka podziału przestrzeni magazynowej, miejsce, w którym bezpośrednio składowane są jednostki logistyczne o określonych parametrach i w określonej ilości. Lokacja opisana jest jednoznacznym adresem, posiada znane wymiary, nośność i pojemność. Znane jest położenie każdej lokacji w przestrzeni (patrz rys. 5.3 oraz rys. 5.4).
- Gniazdo regałowe (półka): przestrzeń wydzielona przez elementy konstrukcyjne regału magazynowego (dowolnego typu), lub też w inny sposób (np. bufor wyznaczony na posadzce przez znaki malowane powierzchniowo). Gniazda regałowe grupują lokacje, a ich konstrukcja decyduje o parametrach fizycznych lokacji. Ich położenie jest jednoznacznie określone w przestrzeni (patrz rys. 5.3).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- Regał: konstrukcja magazynowa w formie ściany, przeważnie określająca przebieg korytarzy transportowych. Regały grupują gniazda regałowe, a ich położenie jest jednoznacznie określone w przestrzeni (patrz rys. 5.3).
- Podstrefa: dowolne zgrupowanie regałów lub ich fragmentów wynikające z wymogów realizowanego procesu. Podstrefy mogą być wydzielone do obsługi konkretnych rodzajów asortymentu, konkretnych typów jednostek magazynowych, wybranych klientów itd., wydzielane są także ze względu na fazy realizacji procesu, np. kompletacji (patrz rys. 5.4).
- Strefy funkcjonalne: odzwierciedlają etapy procesu magazynowego. Zgodnie z fazami procesu magazynowego wyróżnia się strefy rezerw, komisjonowania, buforowe itd. Strefa funkcjonalna dysponuje określoną technologią składowania oraz technologią transportu wewnętrznego. Strefy funkcjonalne grupują podstrefy, ale także regały lub wyłącznie gniazda regałowe, a ich zestawienie odzwierciedla przepływ materiałów przez magazyn (patrz rys. 5.4).
- Obszary magazynowe: grupują strefy funkcjonalne w zależności od potrzeb (patrz rys. 5.4).

Z punktu widzenia organizacji pracy w strefach funkcjonalnych niezwykle istotne jest również wprowadzenia do modelu pojęcia korytarzy roboczych (międzyregałowych). Są to przestrzenie występujące pomiędzy rzędami regałowymi, w których poruszają się i operują środki transportu wewnętrznego i zasoby ludzkie, wykorzystując je do transportu, a także zasilania i opróżniania lokacji regałowych (patrz rys. 5.4).

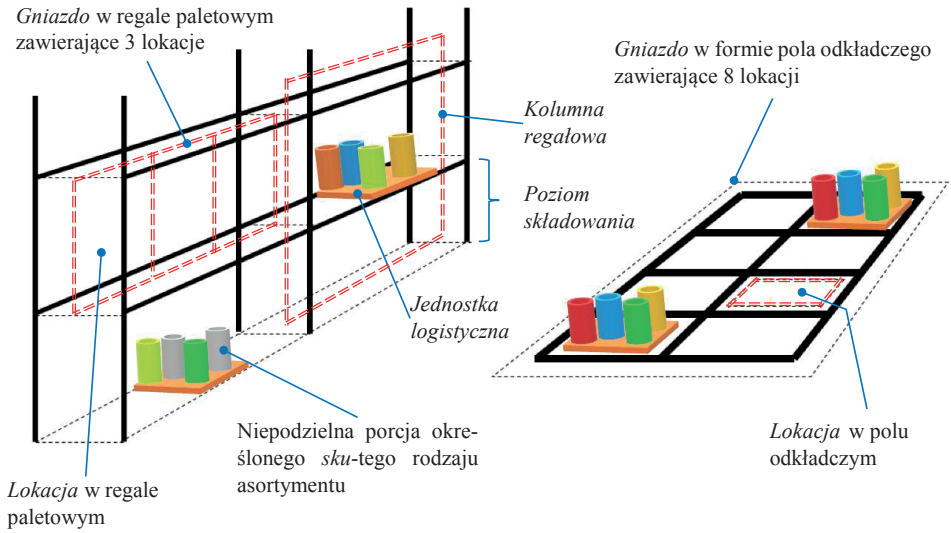
Dodatkowo w celu ułatwienia identyfikacji każdego gniazda regałowego w rzędzie regałowym wprowadzono dodatkowe elementy struktury rzędu regałowego, tzn. kolumna regałowa i poziom składowania. W każdym rzędzie wyróżnić można co najmniej jeden poziom składowania i jedną kolumnę regałową (patrz rys. 5.3).



Rys. 5.2. Schemat podziału przestrzeni magazynowej w modelu ***MPM***

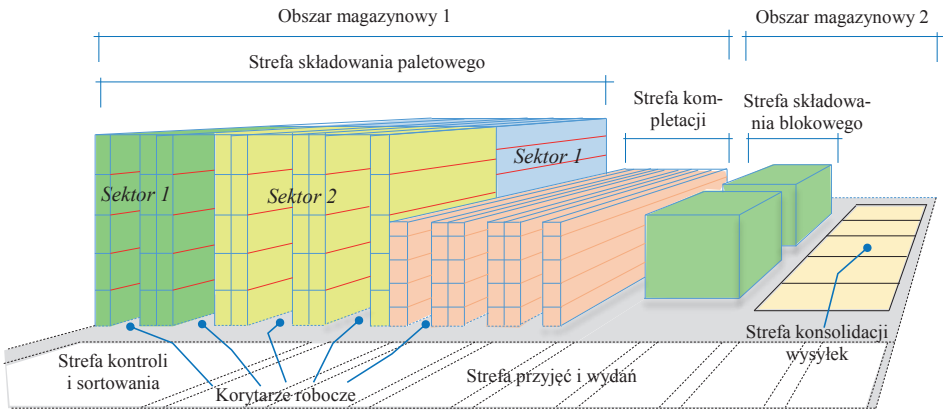
Źródło: opracowanie własne na podstawie [174].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 5.3. Przykład prezentacji lokacji magazynowej

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.4. Jednostki podziału funkcjonalnego przestrzeni magazynowej – przykład

Źródło: opracowanie własne na podstawie[174].

Przedstawiona hierarchiczna klasyfikacja elementów struktury obiektów magazynowych wskazuje, iż podstawowymi elementami magazynów są lokacje. Odpowiadają one za składowanie i buforowanie strumieni materiałów. Są one również głównymi punktami nadań i odbiorów jednostek ładunkowych obsługiwanych w obszarze magazynu. To powoduje, iż powinny one być podstawowymi elementami modelu, odwzorowującymi strukturę obiektów magazynowych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Na potrzeby odwzorowania struktury obiektu magazynowego możliwe jest wykorzystanie założeń teorii grafów. Opierając się na niej struktura magazynu zostanie przedstawiona w postaci grafu ***G***. Wierzchołkami grafu będą lokacje magazynowe, a powiązania pomiędzy nimi (łuki grafu ***G***) będą utożsamiane z drogami jakie przemieszczają strumienie materiałów obsługiwanych w procesie magazynowym. Wobec tego, graf ***G*** może zostać przedstawiony w postaci:

$$\boldsymbol{G} = <\boldsymbol{LM}, \boldsymbol{LU}> \tag{5.2}$$

przy czym:

LM – jest zbiorem numerów lokacji magazynowych – wierzchołków: $\boldsymbol{LM} = \{1, \ldots, lm, \ldots, LM\}$,

LU – jest zbiorem łuków – połączeń między tak interpretowanymi wierzchołkami: $\boldsymbol{LU} = \{(lm, lm'): \varrho\,(lm, lm') = 1 \wedge lm, lm' \in \boldsymbol{LM} \wedge lm \neq lm'\}$.

Łuki odwzorowują w modelu powiązania pomiędzy lokacjami magazynowymi (węzłami). Wobec tego w celu zdefiniowania ich zbioru, na iloczynie kartezjańskim elementów zbioru lokacji ***LM*** zadano odwzorowanie ϱ przeprowadzające ten iloczyn w zbiór $\{1,0\}$:

$$\varrho: \boldsymbol{LM} \times \boldsymbol{LM} \rightarrow \{0,1\} \tag{5.3}$$

przy czym, jeżeli $\varrho\,(lm, lm') = 1$, to między wierzchołkami *lm* oraz *lm'* istnieje połączenie interpretowane jako możliwość przejścia materiału bezpośrednio między nimi.

Łuk pomiędzy dowolnymi dwoma lokacjami – wierzchołkami grafu ***G*** odwzorowuje możliwość przemieszczenia materiałów. Oznacza to, że *lm*-ty wierzchołek może być traktowany jako miejsce pojawiania się strumieni materiałów, które będą transportowane do wierzchołka *lm'*-tego.

Wykorzystana w modelu struktura hierarchiczna uwzględniała również takie elementy, jak: gniazda regałowe, regały, strefy funkcjonalne itp. Dlatego niezbędnym jest zdefiniowanie kolejnych zbiorów, które będą je odwzorowywać:

- zbiór numerów gniazd regałowych

$$\boldsymbol{GR} = \{1, \ldots, gr, \ldots, GR\}, \tag{5.4}$$

- zbiór numerów rzędów regałowych,

$$\boldsymbol{RE} = \{1, \ldots, \mathrm{re}, \ldots, \mathrm{RE}\}, \tag{5.5}$$

- zbiór numerów kolumn regałowych,

$$\boldsymbol{KR} = \{1, \ldots, kr, \ldots, KR\}, \tag{5.6}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– zbiór numerów poziomów składowania

$$\boldsymbol{PS} = \{1, \ldots, ps, \ldots, PS\}, \tag{5.7}$$

– zbiór numerów podstref funkcjonalnych (sektorów)

$$\boldsymbol{PF} = \{1, \ldots, pf, \ldots, PF\}, \tag{5.8}$$

– zbiór numerów stref funkcjonalnych

$$\boldsymbol{SF} = \{1, \ldots, sf, \ldots, SF\}, \tag{5.9}$$

– zbiór numerów obszarów magazynowych

$$\boldsymbol{OM} = \{1, \ldots, ob, \ldots, OB\}, \tag{5.10}$$

– zbiór numerów korytarzy transportowych

$$\boldsymbol{K} = \{1, \ldots, k, \ldots, K\}. \tag{5.11}$$

Wspomniane wyżej lokacje magazynowe są podstawowym elementem struktury magazynu. Na potrzeby opisania lokacji, jako najmniejsze jednostki podziału przestrzeni, należy dokonać ich przypisania do nadrzędnych względem nich elementów, a te do kolejnej nadrzędnej grupy, np. lokacji do gniazd, gniazd do regałów, regałów do stref itd. W tym celu zadano szereg odwzorowań (α1 do α6), przeprowadzające iloczyny kartezjańskie zbioru lokacji ***M*** oraz kolejno zbiorów regałów ***RE***, podstref funkcjonalnych ***PF***, stref funkcjonalnych ***SF***, obszarów magazynowych ***OM*** oraz korytarzy transportowych ***K*** w zbiory dwuelementowe {0, 1}:

– odwzorowanie α1:

$$\alpha 1: \boldsymbol{LM} \times \boldsymbol{GR} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.12}$$

przy czym, jeżeli α1(*lm, gr)* = 1, to *lm*-ta lokacja znajduje się w *gr*-tym gnieździe regałowym oraz 0 w przeciwnym przypadku;

– odwzorowanie α2:

$$\alpha 2: \boldsymbol{LM} \times \boldsymbol{RE} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.13}$$

przy czym, jeżeli α2 (*lm, re)* = 1, to *lm*-ta lokacja znajduje się w *re*-tym regale oraz 0 w przeciwnym przypadku;

– odwzorowanie α3:

$$\alpha 3: \boldsymbol{LM} \times \boldsymbol{PF} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.14}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

przy czym, jeżeli α3 (*lm, pf)* = 1, to *lm*-ta lokacja znajduje się w *pf*-tej podstrefie oraz 0 w przeciwnym przypadku;
- odwzorowanie α4:

$$\alpha 4: \boldsymbol{LM} \times \boldsymbol{SF} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.15}$$

przy czym, jeżeli α4(*lm, sf)* = 1, to *lm*-ta lokacja znajduje się w *sf*-tej strefie funkcjonalnej oraz 0 w przeciwnym przypadku;
- odwzorowanie α5:

$$\alpha 5: \boldsymbol{LM} \times \boldsymbol{OM} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.16}$$

przy czym, jeżeli α5(*lm, ob)* = 1, to *lm*-ta lokacja funkcjonalna znajduje się w *om*-tym obszarze magazynowym, oraz 0 w przeciwnym przypadku;
- odwzorowanie α6:

$$\alpha 6: \boldsymbol{LM} \times \boldsymbol{K} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.17}$$

przy czym, jeżeli α6(*lm, k)* = 1, to *lm-ta* lokacja znajduje się w *k*-tym korytarzu oraz 0 w przeciwnym przypadku.

W ten sposób możliwe jest zidentyfikowanie kolejnych zbiorów elementów struktury obiektu magazynowego, m.in.:
- zbioru lokacji magazynowych w *gr*-tym gnieździe regałowym:

$$\boldsymbol{LM}(gr) = \{lm: \alpha 1(lm, gr) = 1,\ lm \in \boldsymbol{LM}\},\ gr \in \boldsymbol{GR}, \tag{5.18}$$

- zbioru lokacji magazynowych w *re-tym regale:*

$$\boldsymbol{LM}(re) = \{lm: \alpha 2(lm, re) = 1,\ lm \in \boldsymbol{LM}\},\ re \in \boldsymbol{RE}, \tag{5.19}$$

- zbioru lokacji magazynowych w *pf-tej podstrefie:*

$$\boldsymbol{LM}(pf) = \{lm: \alpha 3(lm, pf) = 1,\ lm \in \boldsymbol{LM}\},\ pf \in \boldsymbol{PF}, \tag{5.20}$$

- zbioru lokacji magazynowych w *sf-tej strefie funkcjonalnej:*

$$\boldsymbol{LM}(sf) = \{lm: \alpha 4(lm, sf) = 1,\ lm \in \boldsymbol{LM}\},\ sf \in \boldsymbol{SF}, \tag{5.21}$$

- zbioru lokacji magazynowych w *om-tym obszarze magazynowym:*

$$\boldsymbol{LM}(om) = \{lm: \alpha 5(lm, om) = 1,\ lm \in \boldsymbol{LM}\},\ om \in \boldsymbol{OM}, \tag{5.22}$$

- zbioru lokacji magazynowych w *k-tym korytarzu:*

$$\boldsymbol{LM}(k) = \{lm: \alpha 2(lm, k) = 1,\ lm \in \boldsymbol{LM}\},\ k \in \boldsymbol{K}, \tag{5.23}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Na potrzeby odwzorowania struktury obiektu magazynowego należy również określić, które zależności pomiędzy jej podstawowymi elementami (np. które regały zlokalizowane są w której podstrefie, która podstrefa w której strefie, która strefa w którym obszarze itd.). W tym celu zadano odwzorowania (α7 do α12) przeprowadzające w zbiory dwuelementowe {0, 1}iloczyny kartezjańskie takich zbiorów, jak:

− odwzorowanie α7:

$$\alpha 7: \boldsymbol{RE} \times \boldsymbol{PF} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.24}$$

przy czym, jeżeli α7(*re, pf)* = 1, to *re*-ty rząd regałowy znajduje się w *pf*-tej podstrefie (sektorze) oraz 0 w przeciwnym przypadku;

− odwzorowanie α8:

$$\alpha 8: \boldsymbol{PF} \times \boldsymbol{SF} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.25}$$

przy czym, jeżeli α8(*pf, sf*) = 1, to *pf*-ty sektor zlokalizowany jest w *sf*-tej strefie oraz 0 w przeciwnym przypadku;

− odwzorowanie α9:

$$\alpha 9: \boldsymbol{SF} \times \boldsymbol{OM} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.26}$$

przy czym, jeżeli α9 (*sf, om*) = 1, to *sf*-ta strefa znajduje się w *om*-tym obszarze magazynowym oraz 0 w przeciwnym przypadku;

− odwzorowanie α10:

$$\alpha 10: \boldsymbol{GR} \times \boldsymbol{RE} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.27}$$

przy czym, jeżeli α10(*gr, re*) = 1, to *gr*-te gniazdo regałowo znajduje się w *re*-tym regale oraz 0 w przeciwnym przypadku;

− odwzorowanie α11:

$$\alpha 11: \boldsymbol{K} \times \boldsymbol{PF} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.28}$$

przy czym, jeżeli α11(*k, pf*) = 1, to *k*-ty korytarz znajduje się w *pf*-tym sektorze oraz 0 w przeciwnym przypadku;

− odwzorowanie α12:

$$\alpha 12: \boldsymbol{RE} \times \boldsymbol{K} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.29}$$

przy czym, jeżeli α12(*re, k)* = 1, to *re*-ty rząd regałowy będzie obsługiwany przez urządzenia i pracowników poruszających się w *k*-tym korytarzu oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Na podstawie powyższego możliwe jest zidentyfikowanie kolejnych zbiorów elementów struktury obiektu magazynowego, m.in.:

- zbioru numerów gniazd regałowych znajdujących się w *re*-tym regale:

$$\boldsymbol{GR}(re) = \{gr: \alpha 10(gr, re) = 1, gr \in \boldsymbol{GR}\}, re \in \boldsymbol{RE}, \tag{5.30}$$

- zbioru numerów regałów magazynowych znajdujących się w *pf*-tej strefie:

$$\boldsymbol{RE}(pf) = \{re: \alpha 7(re, pf) = 1, re \in \boldsymbol{RE}\}, pf \in \boldsymbol{PF}, \tag{5.31}$$

- zbioru numerów sektorów (podstref funkcjonalnych) zlokalizowanych w *sf*-tej strefie:

$$\boldsymbol{PF}(sf) = \{pf: \alpha 8(pf, sf) = 1, pf \in \boldsymbol{PF}\}, sf \in \boldsymbol{SF}, \tag{5.32}$$

- zbioru stref w *om*-tym obszarze magazynu:

$$\boldsymbol{SF}(om) = \{sf: \alpha 9(lm, sf) = 1, sf \in \boldsymbol{SF}\}, om \in \boldsymbol{OM}, \tag{5.33}$$

- zbioru korytarzy w *pf*-tym sektorze magazynowym (podstrefie):

$$\boldsymbol{K}(pf) = \{k: \alpha 11(k, pf) = 1, k \in \boldsymbol{K}\}, pf \in \boldsymbol{PF}, \tag{5.34}$$

- zbioru regałów magazynowych obsługiwanych z *k*-tego korytarza:

$$\boldsymbol{RE}(k) = \{re: \alpha 12(re, k) = 1, re \in \boldsymbol{RE}\}, k \in \boldsymbol{K}, \tag{5.35}$$

W celu ułatwienia identyfikacji lokacji magazynowego w rzędzie regałowym zadano odwzorowania (α13 do α12) przeprowadzające w zbiory dwuelementowe {0, 1}iloczyny kartezjańskie takich zbiorów, jak:

- odwzorowanie α13:

$$\alpha 13: \boldsymbol{RE} \times \boldsymbol{KR} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.36}$$

przy czym, jeżeli α13(*re, kr*) = 1, to *kr*-ta kolumna regałowa znajduje się w *re*-tym rzędzie regałowym oraz 0 w przeciwnym przypadku;

- odwzorowanie α14:

$$\alpha 14: \boldsymbol{RE} \times \boldsymbol{PS} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.37}$$

przy czym, jeżeli α14(*re, ps*) = 1, to *ps*-ty poziom składowania znajduje się w *re*-tym rzędzie regałowym oraz 0 w przeciwnym przypadku;

- odwzorowanie α15:

$$\alpha 15: \boldsymbol{GR} \times \boldsymbol{KR} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.38}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

przy czym, jeżeli α15(*gr, kr*) = 1, to *gr*-te gniazdo regałowe znajduje się w *kr*-tej kolumnie regałowej oraz 0 w przeciwnym przypadku,
- odwzorowanie α16:

$$\alpha 16: \boldsymbol{GR} \times \boldsymbol{PS} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.39}$$

przy czym, jeżeli α14(*gr, ps*) = 1, to *gr*-te gniazdo regałowe znajduje się na *ps*-tym poziomie składowania oraz 0 w przeciwnym przypadku.

W ten sposób możliwe jest zidentyfikowanie takich zbiorów, jak:
- zbiór numerów gniazd regałowych znajdujących się w *kr*-tej kolumnie regałowej:

$$\boldsymbol{GR}(kr) = \{gr: \alpha 15(gr, kr) = 1, gr \in \boldsymbol{GR}\}, kr \in \boldsymbol{KR}, \tag{5.40}$$

- zbiór numerów gniazd regałowych znajdujących się w *ps*-tym poziomie składowania:

$$\boldsymbol{GR}(ps) = \{gr: \alpha 16(gr, ps) = 1, gr \in \boldsymbol{GR}\}, ps \in \boldsymbol{PS}, \tag{5.41}$$

- zbiór numerów kolumn regałowych znajdujących się w *re*-tym rzędzie regałowym:

$$\boldsymbol{KR}(re) = \{kr: \alpha 13(re, kr) = 1, kr \in \boldsymbol{KR}\}, re \in \boldsymbol{RE}, \tag{5.42}$$

przy czym jako $\overline{KR(re)}$ oznaczono liczność zbioru $\boldsymbol{KR}(re)$, czyli liczbę kolumn regałowych w danym *re*-tym rzędzie regałowym;
- zbiór numerów poziomów składowania znajdujących się w *re*-tym rzędzie regałowym:

$$\boldsymbol{PS}(re) = \{ps: \alpha 14(re, ps) = 1, ps \in \boldsymbol{PS}\}, re \in \boldsymbol{RE}, \tag{5.43}$$

przy czym jako $\overline{PS(re)}$ oznaczono liczność zbioru $\boldsymbol{PS}(re)$, czyli liczbę poziomów składowania w danym *re*-tym rzędzie regałowym.

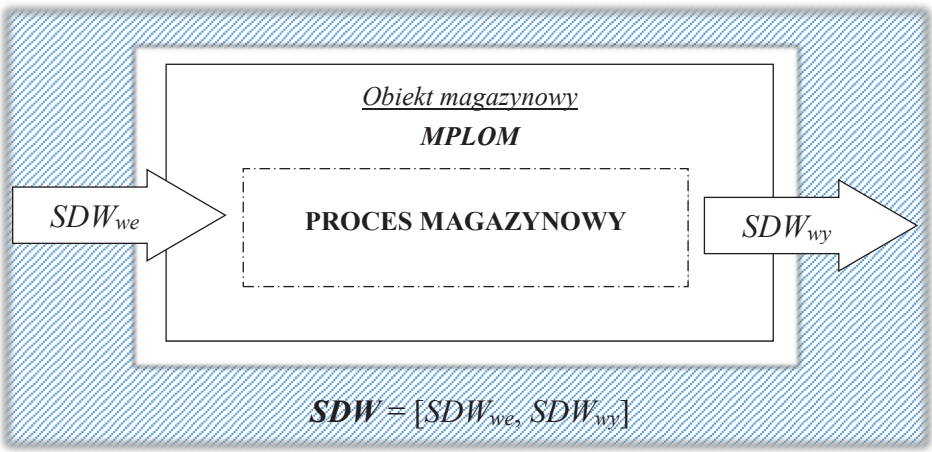
5.3. ZADANIA LOGISTYCZNEGO OBIEKTU MAGAZYNOWEGO

Podstawowym celem funkcjonowania każdego obiektu magazynowego jest realizacja powierzonego mu zadania logistycznego. Zadanie to określa zazwyczaj co? (jaki rodzaj materiału), ile? (ile sztuk bądź jednostek ładunkowych danego rodzaju materiału) ma być obsłużone, skąd? i dokąd? (ma być dany rodzaj asortymentu przewieziony), kiedy? (w jakim czasie) powinno to być wykonane. Wobec tego,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ogólna postać zadania logistycznego dla obiektu magazynowego dotyczy sukcesywnego przekształcania strumieni materiałów i związanych z nim informacji wchodzących do obiektu w strumienie materiałów i informacje go opuszczające.

Strukturę strumieni materiałów i towarzyszących im informacji przetwarzanych na wejściu i wyjściu z magazynu zdefiniowano jako $\boldsymbol{SDW} = [SDW_{we}, SDW_{wy}]$. Za pomocą SDW_{we} odwzorowano strukturą ładunków i informacji obsługiwanych na wejściu, natomiast SDW_{wy} oznacza ich strukturą na wyjściu z obiektu magazynowego (rys. 5.5).



Rys. 5.5. Strumienie materiałów i informacji obsługiwanych przez obiekt magazynowy

Źródło: opracowanie własne.

Na potrzeby opisania strumieni materiałów obsługiwanych przez obiekt magazynowy wprowadzono oznaczenie rodzaju asortymentu *ra*, tj. jednoznacznie identyfikowalny rodzaj, typ bądź numer przypisany każdej najmniejszej obsługiwanej jednostce materiału w magazynie. Zbiór numerów rodzajów asortymentu zapisano jako:

$$\boldsymbol{RA} = \{ra: ra = 1, ..., RA\}. \tag{5.44}$$

Zarówno struktura dostaw, jak i wysyłek powinna zawierać informacje na temat tego co jest dostarczane (wysyłane), kiedy i w jakiej liczbie. W tym celu w modelu wprowadzone zostały następujące pojęcia:

- *dostawa* – określona liczba jednostek ładunkowych *ra*-tych rodzajów materiałów dostarczana do magazynu jednorazowo w chwili (przedziale czasu) *t*. Każda dostawa składa się z określonej liczby linii;
- *linia dostawy* – określa dany *ra*-ty rodzaj materiału wraz z liczbą sztuk na jednostce ładunkowej, który ma być obsłużony na wejściu do obiektu. Na potrzeby modelowania założono, że jedna linia będzie zawierać jedną jednostkę

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ładunkową aby możliwe było jej obsłużenie w pojedynczym cyklu przez zestaw roboczy;
- *wysyłka* – określona liczba jednostek ładunkowych *ra*-tych rodzajów materiałów, które są wysłane z magazynu w ustalonej chwili (przedziale czasu) *t*. Każda wysyłka składa się z określonej liczby linii;
- *linia wysyłki* – opisuje dany *ra*-ty rodzaj materiału wraz z liczbą sztuk na jednostce ładunkowej, który ma być obsłużony na wyjściu z obiektu. Na potrzeby modelowania założono, że jedna linia będzie zawierać jedną jednostkę ładunkową aby możliwe było jej obsłużenie w pojedynczym cyklu przez zestaw roboczy.

Wobec tego na potrzeby modelowania założono, że zbiór $\boldsymbol{D}$ będzie zbiorem numerów dostaw realizowanych w ciągu doby, natomiast zbiór $\boldsymbol{W}$ będzie zbiorem numerów wysyłek z obiektu magazynowego:

$$\boldsymbol{D} = \{d: d = 1, ..., D\}, \tag{5.45}$$

$$\boldsymbol{W} = \{w: w = 1, ..., W\}. \tag{5.46}$$

Jak wspomniano powyżej, każda *d*-ta dostawa oraz *w*-ta wysyłka może być zdekomponowana do określonej liczby linii. Zbiór linii dostaw oznaczono jako $\boldsymbol{LD}$, natomiast zbiór linii wysyłek jako $\boldsymbol{LW}$:

$$\boldsymbol{LD} = \{ld: ld = 1, ..., LD\}, \tag{5.47}$$

$$\boldsymbol{LW} = \{lw: lw = 1, ..., LW\}. \tag{5.48}$$

W tym przypadku należy dodatkowo zidentyfikować, która linia jest elementem składowym której dostawy bądź wysyłki. W tym celu zadano odwzorowanie $\sigma 1$ na iloczynie kartezjańskim elementów zbioru $\boldsymbol{LD}$ i $\boldsymbol{D}$, a także odwzorowanie $\sigma 2$ na iloczynie kartezjańskim elementów zbioru $\boldsymbol{LW}$ i $\boldsymbol{W}$ przeprowadzające ten iloczyny w zbiór $\{1,0\}$:
- odwzorowanie $\sigma 1$:

$$\sigma 1: \boldsymbol{LD} \times \boldsymbol{D} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.49}$$

przy czym, jeżeli $\sigma 1(ld, d) = 1$, to gdy *ld*-ta linia dostawy jest linią wyróżnioną w ramach *d*-tej dostawy oraz 0 w przeciwnym przypadku;
- odwzorowanie $\sigma 2$:

$$\sigma 2: \boldsymbol{LW} \times \boldsymbol{W} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.50}$$

przy czym, jeżeli $\sigma 2$ $(lw, w) = 1$, to gdy *lw*-ta linia wysyłki jest linią wyróżnioną w ramach *w*-tej wysyłki oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Zdefiniowane odwzorowania σ1 oraz σ2 umożliwią zapisanie zbiorów linii należących do danego *d*-tego numeru dostawy (***LD***(*d*)) oraz do danego *w*-tego numeru wysyłki (***LW***(*w*)):

$$\boldsymbol{LD}(d) = \{ld: \sigma 1(ld, d) = 1, ld \in \boldsymbol{LP}\}, d \in \boldsymbol{D}, \tag{5.51}$$

$$\boldsymbol{LW}(w) = \{lw: \sigma 2(lw, w) = 1, lw \in \boldsymbol{LW}\}, w \in \boldsymbol{W}. \tag{5.52}$$

Każda dostawa, wysyłka oraz ich linie muszą być dodatkowo opisane następującymi wielkościami:

- $t(d)$ – określa czas (chwilę, przedział czasu), w którym do obiektu magazynowego dotarła *d*-ta dostawa,
- $t(w)$ – określa czas (chwilę, przedział czasu), w którym z obiektu magazynowego wysłano *w*-tą dostawę,
- $t(ld, d)$ – określa czas (chwilę, przedział czasu), w którym do realizacji wydana została *ld*-ta linia *d*-tej dostawy,
- $t(lw, w)$ – określa czas (chwilę, przedział czasu), w którym do realizacji wydana została *lw*-ta linia *w*-tej wysyłki,
- $ra(ld, d)$ – określa rodzaj materiału jaki należy obsłużyć w *ld*-tej linii *d*-tej dostawy,
- $ra(lw, w)$ – określa rodzaj materiału jaki należy obsłużyć w *lw*-tej linii *w*-tej wysyłki,
- $q(ld, d)$ – określa liczbę sztuk materiału jaki należy obsłużyć w *ld*-tej linii *d*-tej dostawy,
- $q(lw, w)$ – określa liczbę sztuk materiału jaki należy obsłużyć w *lw*-tej linii *w*-tej wysyłki.

Uwzględniając wcześniejsze założenie, wskazujące, iż w pojedynczej linii dostawy oraz wysyłki może obsługiwana być tylko pojedyncza jednostka ładunkowa asortymentu, możliwe jest wyznaczenie:

- liczby jednostek ładunkowych jakie należy obsłużyć w *d*-tej dostawie $Q(d)$:

$$Q(d) = \overline{LD(d)}, \tag{5.53}$$

przy czym, $\overline{LD(d)}$ jest liczebnością zbioru ***LD***(*d*);

- liczby jednostek ładunkowych jakie należy obsłużyć w *w*-tej wysyłce $Q(w)$:

$$Q(w) = \overline{LW(w)}, \tag{5.54}$$

przy czym, $\overline{LW(w)}$ jest liczebnością zbioru ***LW***(*w*);

- liczby jednostek ładunkowych jakie należy obsłużyć w ciągu doby na wejściu do obiektu Q_{we}:

$$Q_{we} = \sum_{d \in \boldsymbol{D}} Q(d) \tag{5.55}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– liczby jednostek ładunkowych jakie należy obsłużyć w ciągu doby na wyjściu z obiektu Q_{wy}:

$$Q_{wy} = \sum_{w \in \boldsymbol{W}} Q(w) \tag{5.56}$$

– liczby sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie należy obsłużyć w *d*-tej dostawie *q*(*d, ra*):

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA}, d \in \boldsymbol{D}} \quad q(d, ra) = \sum_{ld \in \boldsymbol{LD}} q(ld, d) \cdot \sigma 3(ld, d, ra) \tag{5.57}$$

przy czym, $\sigma 3(ld, d, ra) = 1$ jeżeli w *ld-tej linii d*-tej dostawy obsługiwany jest *ra*-ty rodzaj materiału, czyli *ra* (*ld*, *d*) = *ra*, w przeciwnym przypadku $\sigma 3(ld, d, ra) = 0$;

– liczby sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie należy obsłużyć w *w*-tej wysyłce *q*(*w, ra*):

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA}, d \in \boldsymbol{D}} \quad q(d, ra) = \sum_{ld \in \boldsymbol{LD}} q(ld, d) \cdot \sigma 3(ld, d, ra) \tag{5.58}$$

przy czym, $\sigma 4(lw, w, ra) = 1$ jeżeli w *lw*-tej linii *w*-tej dostawy obsługiwany jest *ra*-ty rodzaj materiału, czyli *ra* (*lw*, *w*) = *ra*, w przeciwnym przypadku $\sigma 4(lw, w, ra) = 0$;

– liczby sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie należy obsłużyć w ciągu doby na wejściu do obiektu $q_{we}(ra)$:

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA}} \quad q_{we}(ra) = \sum_{ld \in \boldsymbol{LD}} \sum_{d \in \boldsymbol{D}} q(ld, d) \cdot \sigma 3(ld, d, ra) \tag{5.59}$$

– liczby sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie należy obsłużyć w ciągu doby na wyjściu z obiektu $q_{wy}(ra)$:

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA}} \quad q_{wy}(ra) = \sum_{lw \in \boldsymbol{LW}} \sum_{w \in \boldsymbol{W}} q(lw, w) \cdot \sigma 3(lw, w, ra) \tag{5.60}$$

– liczby jednostek ładunkowych *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie należy obsłużyć w ciągu doby na wejściu do obiektu $Q_{we}(ra)$:

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA}} \quad Q_{we}(ra) = \sum_{ld \in \boldsymbol{LD}} \sum_{d \in \boldsymbol{D}} \sigma 3(ld, d, ra) \tag{5.61}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– liczby jednostek ładunkowych *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie należy obsłużyć w ciągu doby na wyjściu z obiektu $Q_{wy}(ra)$:

$$\forall_{ra\in \boldsymbol{RA}} \quad Q_{wy}(ra) = \sum_{lw\in \boldsymbol{LW}} \sum_{w\in \boldsymbol{W}} \sigma 4(lw, w, ra) \tag{5.62}$$

Strumień wejściowy i wyjściowy strumieni materiałów i informacji może być zatem odwzorowany jako wektor uporządkowanych trójek lub dwójek, z których kolejne elementy mogą mieć różne interpretacje, w zależności od potrzeby i szczegółowości prowadzonych badań, np.:

– czasu pojawienia się danej dostawy (wysyłki), całkowitej liczby jednostek ładunkowych, którego ta dostawa dotyczy:

$$SDW_{we} = \left[\left\langle t(d), Q(d) \right\rangle : d \in \boldsymbol{D} \right] \tag{5.63}$$

$$SDW_{wy} = \left[\left\langle t(w), Q(w) \right\rangle : w \in \boldsymbol{W} \right] \tag{5.64}$$

– czasu pojawienia się danej dostawy (wysyłki), liczby jednostek ładunkowych każdego *ra*-tego rodzaju asortymentu, którego ta dostawa dotyczy:

$$SDW_{we} = \left[\left\langle t(d), Q(d, ra) \right\rangle : d \in \boldsymbol{D}, ra \in \boldsymbol{RA} \right] \tag{5.65}$$

$$SDW_{wy} = \left[\left\langle t(w), Q(w, ra) \right\rangle : w \in \boldsymbol{W}, ra \in \boldsymbol{RA} \right] \tag{5.66}$$

– czasu pojawienia się danej dostawy (wysyłki), liczby sztuk każdego *ra*-tego rodzaju asortymentu, którego ta dostawa dotyczy:

$$SDW_{we} = \left[\left\langle t(d), q(d, ra) \right\rangle : d \in \boldsymbol{D}, ra \in \boldsymbol{RA} \right] \tag{5.67}$$

$$SDW_{wy} = \left[\left\langle t(w), q(w, ra) \right\rangle : w \in \boldsymbol{W}, ra \in \boldsymbol{RA} \right] \tag{5.68}$$

– czasu pojawienia się danej linii dostawy (wysyłki), rodzaju asortymentu, którego ta linia dotyczy oraz określonej w tej linii liczby sztuk materiału:

$$SDW_{we} = \left[\left\langle t(ld, d), ra(ld, d), q(ld, d) \right\rangle : ld \in \boldsymbol{LD}(d), d \in \boldsymbol{D} \right] \tag{5.69}$$

$$SDW_{wy} = \left[\left\langle t(lw, w), ra(lw, w), q(lw, w) \right\rangle : lw \in \boldsymbol{LW}(w), w \in \boldsymbol{W} \right] \tag{5.70}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

5.4. ZASOBY PRACY OBIEKTU MAGAZYNOWEGO

5.4.1. ŚRODKI TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO I MASZYNY

Zasoby pracy wykorzystywane w układach transportu wewnętrznego składają się zazwyczaj ze środków transportu wewnętrznego, ludzi oraz maszyn stacjonarnych. W zależności od ich typu i specyfiki mogą one działać niezależnie lub wymagać powiązania z innym elementem zasobów pracy (zwykle ludzi). W pierwszym przypadku urządzenia i środki działają samodzielnie i nie wymagają ciągłego udziału człowieka podczas ich pracy. Są to urządzenia w pełni zautomatyzowane (np. przenośniki, AS/RS, wózki AGV). W drugim przypadku do ich funkcjonowania niezbędny jest pracownik, którego zadaniem jest obsługa i sterowanie urządzeniem (np. wózek magazynowy z operatorem).

W obiektach magazynowych wyróżnić można wiele różnych typów i rodzajów urządzeń i środków transportu. Dlatego w modelu niezbędne jest odwzorowanie zbioru numerów typów urządzeń i środków transportu wewnętrznego w nim wykorzystywanych $\boldsymbol{TU}$:

$$\boldsymbol{TU} = \{1, \ldots, tu, \ldots, TU\}. \tag{5.71}$$

Zbiór numerów urządzeń magazynowych oznaczono jako $\boldsymbol{U}$ i zapisano w postaci:

$$\boldsymbol{U} = \{1, \ldots, u, \ldots, U\}. \tag{5.72}$$

Każdemu urządzeniu magazynowemu przypisany jest określony typ. Wobec tego na iloczynie kartezjańskim zbiorów $\boldsymbol{U}$ oraz $\boldsymbol{TU}$ zadano odwzorowanie $\mu 0$ przeprowadzające elementy tego iloczynu w elementy zbioru $\{0, 1\}$:

$$\mu 0\colon \boldsymbol{U} \times \boldsymbol{TU} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.73}$$

przy czym $\mu 0(u, tu) = 1$, gdy u-temu urządzeniu przypisano tu-ty typ oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Wobec tego w modelu uwzględniono zbiór $\boldsymbol{U}(tu)$ numerów urządzeń każdego tu-tego typu:

$$\boldsymbol{U}(tu) = \{u\colon \mu 0(u, tu) = 1, u \in \boldsymbol{U}, tu \in \boldsymbol{TU}\}. \tag{5.74}$$

Ze względu na zastosowane oprzyrządowanie oraz parametry techniczno-technologiczne nie wszystkie urządzenia są przystosowane do obsługi każdego rodzaju ładunku występującego w obiekcie magazynowym. Niezbędne jest wobec tego wskazanie, które typy urządzeń mogą być wykorzystywane do realizacji zadań związanych z danym rodzajem asortymentu. W tym celu na iloczynie

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

kartezjańskim zbioru numerów typów urządzeń ***TU*** i zbioru numerów rodzajów asortymentu ***RA*** zadano odwzorowanie $\mu 1$ przeprowadzające elementy tego iloczynu w elementy zbioru {0, 1}:

$$\mu 1\colon \boldsymbol{TU} \times \boldsymbol{RA} \rightarrow \{0, 1\}. \tag{5.75}$$

przy czym $\mu 1(tu, ra) = 1$, gdy asortyment *ra*-tego rodzaju może być obsługiwany urządzeniem *tu*-tego typu oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Stąd zbiór ***TU***(*ra*) numerów rodzajów urządzeń, które mogą obsługiwać dany *ra*-ty rodzaj asortymentu ma postać:

$$\boldsymbol{TU}(ra) = \{tu : tu \in \boldsymbol{TU}, \mu 1(tu, ra) = 1\}. \tag{5.76}$$

Każde urządzenie pracujące w obiekcie wykonuje przydzielone mu zadania. Na potrzeby badań założono, że jednemu urządzeniu można przydzielić do realizacji w tym samym czasie tylko jedno zadanie. Wobec tego na iloczynie kartezjańskim zbioru numerów urządzeń danego *tu*-tego typu ***U***(*tu*) i zbioru numerów chwil czasu ***T*** zadano odwzorowanie $\mu 6$ przeprowadzające jego elementy w zbiór dwuelementowy:

$$\mu 6\colon \boldsymbol{U}(tu) \times \boldsymbol{T} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.77}$$

przy czym $\mu 6(u, t) = 1$, gdy *u*-te urządzenie w *t*-tej chwili nie jest w trakcie realizacji zadania i istnieje możliwość przydzielenia mu innego zadania oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Na potrzeby szacowania w modelu charakterystyk związanych z wydajnością i efektywnością procesu magazynowego a także bezpieczeństwem pracy niezbędne jest odpowiednie sparametryzowanie urządzeń, które są w nim stosowane. Wobec tego do opisu urządzeń wykorzystano takie charakterystyki, jak m.in.:

kgp(*tu*) – koszt godziny pracy *tu*-tego urządzenia uwzględniający koszty zmienne oraz stałe,

qu(*ra, tu*) – liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie może jednocześnie obsłużyć urządzenie *tu*-tego typu (ładowność urządzenia),

vx(*tu*) – maksymalna prędkość horyzontalna *tu*-tego urządzenia,

vz(*tu*) – maksymalna prędkość wertykalna *tu*-tego urządzenia,

vx(*u, t*) – chwilowa prędkość horyzontalna *u*-tego urządzenia w danej chwili *t*,

ts(*tu*) – czas skrętu *tu*-tego urządzenia, odwzorowujący stratę czasu wynikającą z redukcji prędkości poruszania się urządzenia podczas manewru skrętu,

sh(*tu, vx*(*u, t*)) – droga hamowania *tu*-tego urządzenia, w przypadku gdy urządzenie porusza się w chwili jego rozpoczęcia z prędkością *vx*(*u*, *t*),

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

$sz(tu, vx(u, t))$ – droga zatrzymania *tu*-tego urządzenia, w przypadku gdy urządzenie porusza się w chwili rozpoczęcia hamowania z prędkością $vx(u, t)$.

5.4.2. PRACOWNICY MAGAZYNOWI

W zależności od zakresu obowiązków, kwalifikacji, czy stawek godzinowych w obiektach magazynowych można wyróżnić różne kategorie pracy ludzkiej. Wobec tego jako ***KP*** oznaczono zbiór numerów takich kategorii:

$$\boldsymbol{KP} = \{1, \ldots, kp, \ldots, KP\}. \tag{5.78}$$

Zbiór numerów pracowników magazynowych oznaczono jako ***PR*** i zapisano w postaci:

$$\boldsymbol{PR} = \{1, \ldots, pr, \ldots, PR\}. \tag{5.79}$$

Każdemu pracownikowi magazynowemu przypisana jest określona kategoria pracy. Wobec tego na iloczynie kartezjańskim zbiorów ***KP*** oraz ***PR*** zadano odwzorowanie $\mu 2$ przeprowadzające elementy tego iloczynu w elementy zbioru $\{0, 1\}$:

$$\mu 2: \boldsymbol{PR} \times \boldsymbol{KP} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.80}$$

przy czym $\mu 2(pr, kp) = 1$, gdy *pr*-temu pracownikowi przypisano *kp*-tą kategorię pracę oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Stąd zbiór $\boldsymbol{PR}(kp)$ numerów pracowników, *kp*-tej kategorii pracy ma postać:

$$\boldsymbol{PR}(kp) = \{pr \in \boldsymbol{PR} : \mu 2(pr, kp) = 1\}. \tag{5.81}$$

Jak wcześniej założono, zasoby pracy mogą być kombinacją urządzeń i zasobów ludzkich. Na potrzeby odwzorowania tego, którzy pracownicy, której kategorii pracy mogą bądź mają uprawnienia i umiejętności do obsługi konkretnych typów urządzeń na iloczynie kartezjańskim zbioru ***TU*** numerów typów urządzeń i zbioru ***KP*** numerów kategorii pracy ludzkiej zadano odwzorowanie μ3 przeprowadzające elementy tego iloczynu w elementy zbioru $\{0, 1\}$:

$$\mu 3: \boldsymbol{TU} \times \boldsymbol{KP} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.82}$$

przy czym $\mu 3(tu, kp) = 1$, gdy pracownik *kp*-tej kategorii pracy może obsługiwać urządzenie *tu*-tego typu oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wobec powyższego zbiór typów urządzeń, które mogą być obsługiwane przez pracownika *kp*-tej kategorii pracy ma postać:

$$\boldsymbol{TU}(kp) = \{tu \in \boldsymbol{TU} : \mu 3(tu, kp) = 1\}. \tag{5.83}$$

Dodatkowo, podobnie jak w przypadku urządzeń, w modelu niezbędne jest odwzorowanie możliwości obsługi poszczególnych rodzajów ładunków przez pracowników danej kategorii pracy ludzkiej. W tym celu na iloczynie kartezjańskim zbioru numerów kategorii pracy ludzkiej ***KP*** i zbioru numerów rodzajów asortymentu ***RA*** zadano odwzorowanie μ4 przeprowadzające elementy tego iloczynu w elementy zbioru {0, 1}:

$$\mu 4: \boldsymbol{KP} \times \boldsymbol{RA} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.84}$$

przy czym $\mu 4(kp, ra) = 1$, gdy asortyment *ra*-tego rodzaju może być obsługiwany przez pracownika *kp*-tej kategorii pracy ludzkiej oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Stąd zbiór rodzajów asortymentu, które może obsługiwać pracownik *kp*-tej kategorii pracy ludzkiej ma postać:

$$\boldsymbol{RA}(kp) = \{ra \in \boldsymbol{RA} : \mu 4(kp, ra) = 1\}, \tag{5.85}$$

natomiast zbiór kategorii pracy ludzkiej, które mogą obsługiwać dany *ra*-ty asortyment ma postać:

$$\boldsymbol{KP}(ra) = \{kp \in \boldsymbol{KP} : \mu 4(kp, ra) = 1\}. \tag{5.86}$$

Każdy pracownik wykonuje określone zadania przydzielone mu przez system zarządzania obiektem magazynowym. Na potrzeby prowadzonych badań założono, że jeden pracownik może realizować jedno zadanie w tym samym czasie. Wobec tego na iloczynie kartezjańskim zbioru numerów pracowników danej *kp*-tej kategorii pracy ludzkiej ***PR***(*kp*) i zbioru numerów chwil czasu ***T*** zadano odwzorowanie $\mu 5$ przeprowadzające jego elementy w zbiór dwuelementowy:

$$\mu 5: \boldsymbol{PR}(kp) \times \boldsymbol{T} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.87}$$

przy czym $\mu 5(pr, t) = 1$, gdy *pr*-ty pracownik w *t*-tej chwili nie realizuje zadania i istnieje możliwość przydzielenia mu następnego zadania oraz 0 w przeciwnym przypadku (gdy w *t*-tej chwili *pr*-ty pracownik jest „wolny" i może być aktualnie wykorzystany do realizacji zadania).

Dodatkowo, na potrzeby prowadzonych badań, w modelu pracownicy *kp*-tych kategorii pracy zostali scharakteryzowani przez charakterystyki kosztowe obejmujące koszt godziny pracy pracownika *kgp*(*kp*), uwzględniający wynagrodzenie brutto pracownika i dodatkowe koszty ponoszone przez pracodawcę.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

5.5. CHARAKTERYSTYKI ELEMENTÓW STRUKTURY MAGAZYNU

W rozdziale 5.2 przedstawiono główne elementy struktury modelu ***MPLOM*** i założono, że podstawową jednostką przestrzeni w obiekcie magazynowym jest lokacja magazynowa. Każda z takich lokalizacji ma swój niepowtarzalny i w pełni identyfikowalny numer (**LOKID**(*lm*)) oraz szereg charakterystyk.

W celu zidentyfikowania lokacji w przestrzeni magazynu niezbędne jest określenie elementów struktury magazynu, w których są one zlokalizowane, a dokładnie:

- numeru gniazda regałowego *gr*,
- numeru regału *re*,
- numeru podstrefy funkcjonalnej (sektora) *pf*,
- numeru strefy funkcjonalnej *sf*,
- numeru obszaru magazynowego *om*,
- numeru korytarza *k*.

Wobec tego, na potrzeby opracowania numeru identyfikacyjnego (adresu) dla poszczególnych *lm*-tych lokacji należy określić:

- *gr*(*lm*) – numer gniazda regałowego, do którego przypisana jest *lm*-ta lokacja

$$\forall_{lm \in \boldsymbol{LM}} \forall_{gr \in \boldsymbol{GR} \,:\, lm \in \boldsymbol{LM}(gr)} \;\; gr\,(lm) = gr\,, \tag{5.88}$$

- *re*(*lm*) – numer regału, do którego przypisana jest *lm*-ta lokacja

$$\forall_{lm \in \boldsymbol{LM}} \forall_{re \in \boldsymbol{RE} \,:\, lm \in \boldsymbol{LM}(re)} \;\; re\,(lm) = re\,, \tag{5.89}$$

- *pf*(*lm*) – numer podstrefy funkcjonalnej (sektora), do której przypisana jest *lm*-ta lokacja

$$\forall_{lm \in \boldsymbol{LM}} \forall_{pf \in \boldsymbol{PF} \,:\, lm \in \boldsymbol{LM}(pf)} \;\; pf\,(lm) = pf\,, \tag{5.90}$$

- *sf*(*lm*) – numer strefy funkcjonalnej, do której przypisana jest *lm*-ta lokacja

$$\forall_{lm \in \boldsymbol{LM}} \forall_{sf \in \boldsymbol{SF} \,:\, lm \in \boldsymbol{LM}(sf)} \;\; sf\,(lm) = sf\,, \tag{5.91}$$

- *om*(*lm*) – numer obszaru magazynowego, do którego przypisana jest *lm*-ta lokacja

$$\forall_{lm \in \boldsymbol{LM}} \forall_{om \in \boldsymbol{OM} \,:\, lm \in \boldsymbol{LM}(om)} \;\; om\,(lm) = om\,, \tag{5.92}$$

- *k*(*lm*) – numer korytarza, do którego przypisana jest *lm*-ta lokacja

$$\forall_{lm \in \boldsymbol{LM}} \forall_{k \in \boldsymbol{K} \,:\, lm \in \boldsymbol{LM}(k)} \;\; k\,(lm) = k. \tag{5.93}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Na podstawie powyższego numer identyfikacyjny każdej *lm*-tej lokacji można przedstawić za pomocą wektora **LOKID**(*lm*) postaci:

$$\mathbf{LOKID}(lm) = <gr(lm), re(lm), pf(lm), sf(lm), om(lm), k(lm)>,\ lm \in \boldsymbol{LM}. \quad (5.94)$$

W magazynie może też być taka sytuacja, iż dana lokacja nie należy do żadnego gniazda regałowego. Wówczas pierwszy element zdefiniowanego wyżej wektora przyjmie wartość 0.

Podstawowym zadaniem lokacji magazynowych jest przechowywanie poszczególnych rodzajów asortymentu. Lokacje mają określone parametry i charakterystyki, które determinują możliwość składowania w nich danego rodzaju asortymentu. Dlatego w celu określenia zbioru rodzajów asortymentu $\boldsymbol{RA}(lm)$, które mogą być składowane w *lm*-tej lokacji na iloczynie kartezjańskim zbioru $\boldsymbol{RA}$ typów asortymentów oraz zbioru $\boldsymbol{LM}$ lokacji zadano odwzorowanie $\xi 1$, które przeprowadza jego elementy w elementy zbioru {0, 1}, tj.:

$$\xi 1 : \boldsymbol{RA} \times \boldsymbol{LM} \rightarrow \{0, 1\}, \quad (5.95)$$

przy czym wielkość $\xi 1\ (ra, lm) = 1$ jeżeli asortyment *ra*-tego typu może być przechowywany lub obsługiwany w *lm*-tej lokacji magazynowej, zaś 0 w przeciwnym przypadku.

Stąd zbiór rodzajów asortymentu $\boldsymbol{RA}(lm)$, które mogą być przechowywane w *lm*-tej lokacji ma postać:

$$\boldsymbol{RA}(lm) = \{ra \in \boldsymbol{RA} : \xi 1\ (ra, lm) = 1\}. \quad (5.96)$$

Jeżeli dana lokacja może przechowywać określony rodzaj asortymentu, wówczas niezbędne jest zdefiniowanie dla niej parametru wskazującego jaką maksymalną pojemność ma lokacja z punktu widzenia danego rodzaju asortymentu. Wobec tego założono, że pojemność danej *lm*-tej lokacji mierzona w liczbie sztuk danego *ra*-tego rodzaju asortymentu będzie oznaczana jako $Q_{max}(ra,\ lm)$, przy czym $Q_{max}(ra, lm) \in \mathcal{R}^+$.

Na potrzeby analizy procesu magazynowego i możliwych sposobów jego realizacji istotna jest również informacja o aktualnym zapełnieniu każdej lokacji magazynowej. Może być ona określana procentowo bądź też w liczbie jednostek danego rodzaju asortymentu. W tym celu założono, że jako $Q(ra,\ lm,\ t)$ będzie oznaczana liczba sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu znajdującego się w *lm*-tej lokacji oraz w *t*-tej chwili prowadzonych analiz, przy czym $Q(ra, lm, t) \in \mathcal{R}^+, t \in \boldsymbol{T}, lm \in \boldsymbol{LM}, ra \in \boldsymbol{RA}$. Co ważne, w żadnej z analizowanych okresów czasu *t*, zapełnienie *lm*-tej lokacji nie może być większe od jej pojemności maksymalnej, tj:

$$\forall_{lm \in \boldsymbol{LM}, t \in \boldsymbol{T}, ra \in \boldsymbol{RA}}\ Q(ra, lm, t) \leq Q_{max}(lm, ra), \quad (5.97)$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Dodatkowo założono, że w obiekcie magazynowym w każdej *t*-tej chwili obsługiwanych jest $Q(ra,t)$ jednostek ładunkowych *ra*-tego typu.

W podobny sposób możliwe jest odwzorowanie zapełnienia kolejnych elementów struktury hierarchicznej magazynu. W tym przypadku zapełnienie będzie określać liczbę sztuk jednostek ładunkowych danego *ra*-tego rodzaju asortymentu. Założono, że na elementach struktury zadane zostaną następujące charakterystyki dotyczące ich zapełnienia:

- $Q(ra, gr, t)$ liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu w *gr*-tym gnieździe regałowym oraz w *t*-tej chwili,
- $Q(ra, re, t)$ liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu w *re*-tym regale oraz w *t*-tej chwili,
- $Q(ra, pf, t)$ liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu w *pf*-tym sektorze oraz w *t*-tej chwili,
- $Q(ra, sf, t)$ liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu w *sf*-tej strefie oraz w *t*-tej chwili,
- $Q(ra, om, t)$ liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu w *om*-tym obszarze magazynu oraz w *t*-tej chwili,
- $Q_{max}(ra, gr)$ maksymalna liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu jakie można ulokować w *gr*-tym gnieździe regałowym,
- $Q_{max}(ra, re)$ maksymalna liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu jakie można ulokować w *re*-tym regale,
- $Q_{max}(ra, pf)$ maksymalna liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu jakie można ulokować w *pf*-tym sektorze,
- $Q_{max}(ra, sf)$ maksymalna liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu jakie można ulokować w *sf*-tej strefie,
- $Q_{max}(ra, om)$ maksymalna liczba jednostek ładunkowych *ra*-tego asortymentu jakie można ulokować w *om*-tym obszarze magazynu,

W przypadku, gdy istotna jest ogólna informacja nt. stopnia zapełnienia danego elementu struktury w odniesieniu do jego pojemności i niewymagana jest wiedza na temat konkretnej liczby jednostek danego rodzaju asortymentu, wówczas możliwe jest wykorzystanie poniższych charakterystyk:

- $Q(gr, t)$ liczba jednostek ładunkowych w *gr*-tym gnieździe regałowym oraz w *t*-tej chwili,

$$\forall_{gr \in \boldsymbol{GR}, t \in \boldsymbol{T}}\, Q(gr,t) = \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Q(ra,gr,t), \tag{5.98}$$

- $Q(re, t)$ liczba jednostek ładunkowych w *re*-tym regale oraz w *t*-tej chwili,

$$\forall_{re \in \boldsymbol{RE}, t \in \boldsymbol{T}}\, Q(re,t) = \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Q(ra,re,t), \tag{5.99}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– $Q(pf, t)$ liczba jednostek ładunkowych w pf-tym sektorze oraz w t-tej chwili,

$$\forall_{pf \in \boldsymbol{PF}, t \in \boldsymbol{T}}\, Q(pf, t) = \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Q(ra, pf, t), \tag{5.100}$$

– $Q(sf, t)$ liczba jednostek ładunkowych w sf-tej strefie oraz w t-tej chwili,

$$\forall_{sf \in \boldsymbol{SF}, t \in \boldsymbol{T}}\, Q(sf, t) = \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Q(ra, sf, t), \tag{5.101}$$

– $Q(om, t)$ liczba jednostek ładunkowych w om-tym obszarze magazynu oraz w t-tej chwili,

$$\forall_{om \in \boldsymbol{OM}, t \in \boldsymbol{T}}\, Q(om, t) = \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Q(ra, om, t). \tag{5.102}$$

Jak wcześniej wspomniano, lokacja może odwzorowywać pole odkładcze na posadzce, gniazdo w regale paletowym, półkę w regale półkowym itp. Dlatego do obsługi poszczególnych lokacji mogą lub muszą być wykorzystywane urządzenia różnych typów oraz pracownicy różnych kategorii pracy. Aby odwzorować możliwości obsługi lokacji przez urządzenia określonych typów oraz pracowników danej kategorii pracy na iloczynie kartezjańskim zbioru ***LM*** numerów lokacji i zbiorów ***TU*** numerów typów urządzeń oraz ***KP*** numerów kategorii pracy ludzkiej zadano odwzorowania $\xi 2$ i $\xi 3$, które przeprowadzają jego elementy w elementy zbioru $\{0, 1\}$, tj.:

$$\xi 2 : \boldsymbol{TU} \times \boldsymbol{LM} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.103}$$

$$\xi 3 : \boldsymbol{KP} \times \boldsymbol{LM} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.104}$$

przy czym wielkość $\xi 2(tu, lm) = 1$ jeżeli urządzenia tu-tego typu mogą obsługiwać lm-tą lokację magazynową (w przeciwnym przypadku $\xi 2(tu, lm) = 0$), zaś wielkość $\xi 3(kp, lm) = 1$ jeżeli pracownicy kp-tej kategorii pracy mogą obsługiwać lm-tą lokację magazynową, natomiast 0 w przeciwnym przypadku.

Wykorzystując odwzorowania $\xi 2$ i $\xi 3$ możliwe jest zdefiniowanie zbioru numerów typów urządzeń $\boldsymbol{TU}(lm)$, oraz zbioru numerów kategorii pracy ludzkiej $\boldsymbol{KP}(lm)$, które mogą obsługiwać lm-tą lokację:

$$\boldsymbol{TU}(lm) = \{tu \in \boldsymbol{TU} : \xi 2\ (tu, lm) = 1\}, \tag{5.105}$$

$$\boldsymbol{KP}(lm) = \{kp \in \boldsymbol{KP} : \xi 3\ (kp, lm) = 1\}. \tag{5.106}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Na potrzeby określenia pojemności każdej lokacji, możliwości składowania w niej danego rodzaju asortymentu niezbędna jest znajomość wymiarów lej lokacji. Podobnie w przypadku korytarzy roboczych. Niezbędna jest znajomość ich szerokości aby możliwe było określenie, które typy urządzeń mogą być w nich stosowane. Wobec tego dla tych i innych elementów struktury magazynu określono następujące charakterystyki:

- $x(lm)$ szerokość *lm*-tej lokacji magazynowej (w metrach),
- $y(lm)$ głębokość *lm*-tej lokacji magazynowej (w metrach),
- $z(lm)$ wysokość *lm*-tej lokacji magazynowej (w metrach),
- $x(gr)$ szerokość *gr*-tego gniazda regałowego (w metrach),
- $y(gr)$ głębokość *gr*-tego gniazda regałowego (w metrach),
- $z(gr)$ wysokość *gr*-tego gniazda regałowego (w metrach),
- $x(re)$ szerokość *re*-tego rzędu regałowego (w metrach),
- $y(re)$ głębokość *re*-tego rzędu regałowego (w metrach),
- $z(re)$ wysokość *re*-tego rzędu regałowego (w metrach),
- $lkr(re)$ liczba kolumn regałowych w *re*-tym rzędzie regałowym, $lkr(re) = \overline{KR(re)}$,
- $lpz(re)$ liczba poziomów składowania *re*-tego rzędu regałowego, $lpz(re) = \overline{PS(re)}$,
- $x(k)$ szerokość *k*-tego korytarza roboczego (w metrach),
- $x(ra)$ szerokość jednostki ładunkowej *ra*-tego rodzaju asortymentu (w metrach),
- $y(ra)$ głębokość jednostki ładunkowej *ra*-tego rodzaju asortymentu (w metrach),
- $z(ra)$ wysokość jednostki ładunkowej *ra*-tego rodzaju asortymentu (w metrach).

5.6. ORGANIZACJA PROCESU MAGAZYNOWEGO

5.6.1. SYSTEM INFORMACYJNY – PRZETWARZANIE INFORMACJI I ZADAŃ

System informacyjny w obiektach magazynowych służy do przetwarzania strumieni informacji, zarządzania nimi i przekształcania ich w odpowiednie zadania magazynowe (niezbędne do wykonania na potrzeby realizacji zadania logistycznego). Odpowiada on za komunikację pomiędzy elementem sterującym (systemem zarządzania magazynem *WMS*[2]), automatyką magazynową, zasobami pracy (urządzeniami transportowymi i pracownikami), a także systemem

[2] *WMS – Warehouse Management System.*

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

nadrzędnym (w tym komunikacja z elementami zewnętrznymi, np. dostawcy, odbiorcy).

Do głównych zadań podsystemu przetwarzania informacji zalicza się [184]:

- interpretację informacji otrzymywanych od systemu nadrzędnego (np. ERP) lub bezpośrednio od klientów w zakresie poleceń wydania, awizacji,
- analiza otrzymywanych informacji i konfrontowanie ich ze stanami magazynowymi i dostępnymi zasobami pracy oraz dostępną przestrzenią,
- przekazywanie poleceń i zadań do zasobu wykonującego (urządzenie lub pracownik),
- rejestracja przemieszczenia materiału lub zmiany postaci fizycznej,
- archiwizacja wykonanych zadań w przewidzianym zakresie,
- przetwarzanie informacji z wykorzystaniem dostępnych technologii (np. standardy GS1, kody graficzne, RFiD i inne),
- raportowanie do systemu nadrzędnego (lub wskazanego podmiotu) o statusie realizacji zadania,
- rejestrowanie, kontrolowanie i zarządzanie stanami magazynowymi,
- pomiar wydajności elementów systemu w oparciu o dane dostępne w systemie,
- kontrola dostępu zgodnie z przydzielonymi kompetencjami,
- realizacja funkcji dodatkowych, związanych np. z planowaniem, analizami i szacowaniem kosztów.

Na potrzeby modelowania procesu magazynowego jedną z kluczowych funkcji systemu informacyjnego jakie należy uwzględnić jest generowanie zadań magazynowych i przydzielanie ich odpowiednim pracownikom i zasobom pracy. Zadania generowane są na podstawie informacji napływających do systemu z zewnątrz (zamówienia na towary znajdujące się w magazynie, przybyłe do magazynu dostawy opisane w postaci linii, podstawienie się pod dok ładunkowy pojazdu do załadunku itp.), jak i aktualnej sytuacji w obiekcie magazynowym (np. potrzeba inwentaryzacji, przepakowania, zabezpieczenia ładunku). Wobec tego założono, że w postaci zbioru $\boldsymbol{ZDR}$ odwzorowany będzie zbiór numerów zadań jakie należy zrealizować w obiekcie magazynowym w ciągu określonego okresu czasu (np. doby):

$$\boldsymbol{ZDR} = \{1, \ldots, zdr, \ldots, ZDR\}. \tag{5.107}$$

W zależności od typu zadania, jego czasochłonności, priorytetu, a także organizacji procesu magazynowego poszczególne *zdr*-te zadania powinny być wydane do realizacji w ściśle określonym momencie pracy obiektu. Wobec tego na iloczynie kartezjańskim zbiorów $\boldsymbol{ZDR}$ oraz $\boldsymbol{T}$ zadano odwzorowanie ω przeprowadzające elementy tego iloczynu w elementy zbioru {0, 1}:

$$\omega 1 : \boldsymbol{ZDR} \times \boldsymbol{T} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.108}$$

przy czym $\omega 1(zdr, t) = 1$, gdy *zdr*-te zadanie jest gotowe do wydania do realizacji w *t*-tej chwili oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Na podstawie powyższego zdefiniowano zbiór ***ZDR***(*t*) numerów zadań gotowych do realizacji w *t*-tej chwili analizy:

$$\boldsymbol{ZDR}(t) = \{ zdr: zdr \in \boldsymbol{ZDR}, \omega 1(zdr, t) = 1\}. \tag{5.109}$$

Zadania wykonywane w obiektach magazynowych mogą być różnego typu. W modelu założono, że w procesie magazynowym analizowane będą dwa typy zadań, tj. zadanie przemieszczania oraz zadanie przetwarzania materiałów (np. zmiana postaci materiałów, rozdział i konsolidacja, kontrola i identyfikacja). Dlatego zdefiniowano zbiór numerów typów zadań ***TZAD***, gdzie jako *typz* określono numer typu zadania i może on przyjmować wartości ze zbioru {1, 2}:

$$\boldsymbol{TZAD} = \{1, 2\}. \tag{5.110}$$

W zależności od typu zadanie może być realizowane przez określone typy urządzeń i pracowników. Dlatego na iloczynie kartezjańskim zbioru ***TZAD*** oraz zbiorów ***TU*** i ***KP*** zadano odwzorowanie ω2 oraz ω3 przeprowadzające elementy tego iloczynu w elementy zbioru {0, 1}:

$$\omega 2 : \boldsymbol{TZAD} \times \boldsymbol{TU} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.111}$$

$$\omega 3 : \boldsymbol{TZAD} \times \boldsymbol{KP} \rightarrow \{0, 1\}, \tag{5.112}$$

przy czym ω2(*tzad, tu*) = 1, gdy urządzenie *tu*-tego typu może być wykorzystywane do realizacji *tzad*-tego zadania, oraz 0 w przeciwnym przypadku, natomiast ω3(*tzad, kp*) = 1, gdy pracownik *kp*-tej kategorii pracy może wykonywać *tzad*-te zadanie oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Każde zadanie przed wydaniem do realizacji powinno być opisane szeregiem informacji, do których należą m.in.: numer zadania (*zdr*), typ zadania (*typz*(*zdr*)), czas gotowości do realizacji (*tgot*(*zdr*)), rodzaj ładunku (*ras*(*zdr*)), liczba sztuk ładunku (*q*(*zdr*)), miejsce rozpoczęcia zadania (*lmp*(*zdr*)), miejsce zakończenia zadania (*lmz*(*zdr*)). Wobec tego każde *zdr*-te zadanie może być przedstawione w postaci wektora **WZDR**(*zdr*):

$$\mathbf{WZDR}(zdr) = < typz(zdr), tgot(zdr), ras(zdr), q(zdr), lmp(zdr), lmz(zdr)>, \tag{5.113}$$

przy czym:

- na zbiorze ***ZDR*** zadano odwzorowanie *typz,* które przyjmuje wartości ze dwuelementowego zbioru ***TZAD***:

$$typz : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{TZAD}, \tag{5.114}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}, tzad \in \boldsymbol{TZAD}} \; typz\,(zdr) = tzad, \tag{5.115}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

przy czym, jeżeli zadanie odwzorowuje przemieszczanie, wówczas *tzad* = 1, oraz *typz*(*zdr*) = 1, natomiast w przypadku gdy oznacza ono przetwarzanie materiałów, wówczas *tzad* = 2 oraz *typz*(*zdr*) = 2,

- czas gotowości *zdr*-tego zadania do realizacji *tgot*(*zdr*) określa chwilę, w której zadanie może lub powinno być wydane do realizacji. W celu jego odwzorowania na zbiorze ***ZDR*** zadano odwzorowanie *tgot,* które przeprowadza elementy tego zbioru w elementy ze zbioru ***T***:

$$tgot : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{T}, \tag{5.116}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR},\ t \in \boldsymbol{T}} \quad tgot\,(zdr) = t\,, \tag{5.117}$$

- rodzaj ładunku jaki należy przemieścić bądź przetworzyć w *zdr*-tym zadaniu *ras*(*zdr*) określany jest za pomocą typów rodzajów asortymentu, dlatego na zbiorze ***ZDR*** zadano odwzorowanie *ras,* które przeprowadza elementy tego zbioru w elementy ze zbioru ***RA***:

$$ras : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{RA}, \tag{5.118}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR},\ ra \in \boldsymbol{RA}} \quad ras\,(zdr) = ra\,, \tag{5.119}$$

- liczba jednostek ładunku jakie należy przemieścić bądź przetworzyć w *zdr*-tym zadaniu opisana została za pomocą *q*(*zdr*). Wartości jakie przyjmuje nie mogą być ujemne:

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \quad q\,(zdr) > 0, \tag{5.120}$$

- miejsce rozpoczęcia (*lmp*(*zdr*)) oraz zakończenia (*lmz*(*zdr*)) zadania jest jedną z dostępnych w magazynie *lm*-tych lokacji, wobec tego parametry te przyjmują wartości ze zbioru ***LM*** na potrzeby prowadzonych badań na zbiorze ***ZDR*** zadano odwzorowania *lmp* oraz *lmz,* które przeprowadzają elementy tego zbioru w elementy ze zbioru ***LM***:

$$lmp : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{LM}, \tag{5.121}$$

$$lmz : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{LM}, \tag{5.122}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR},\ lm \in \boldsymbol{LM}} \quad lmp\,(zdr) = lm\,, \tag{5.123}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR},\ lm \in \boldsymbol{LM}} \quad lmz\,(zdr) = lm\,, \tag{5.124}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– miejsce rozpoczęcia (*lmp*(*zdr*)) oraz zakończenia (*lmz*(*zdr*)) zadania przyjmują różne wartości ze zbioru ***LM*** jeżeli zadanie dotyczy przemieszczania (*typz*(*zdr*) = 1):

$$\forall_{zdr\,:\,zdr\in \boldsymbol{ZDR}\wedge typz(zdr)\,=\,1}\quad lmp\,(zdr)\neq lmz\,(zdr)\,, \tag{5.125}$$

– miejsce rozpoczęcia (*lmp*(*zdr*)) oraz zakończenia (*lmz*(*zdr*)) zadania przyjmują takie same wartości ze zbioru ***LM*** jeżeli zadanie dotyczy przetwarzania w tej samej lokacji magazynowego (*typz*(*zdr*) = 2):

$$\forall_{zdr\,:\,zdr\in \boldsymbol{ZDR}\wedge typz(zdr)\,=\,2}\quad lmp\,(zdr)=lmz\,(zdr)\,. \tag{5.126}$$

Każde gotowe do realizacji zadanie powinno zostać niezwłocznie przekazane do realizacji. Należy przydzielić mu zatem odpowiednie zasoby pracy. Wobec tego zadania wydane do realizacji powinny być opisane dodatkowo za pomocą numeru kategorii pracy ludzkiej oraz numeru typu urządzenia jakie będzie je realizować. Podobnie jak w przypadku zadań gotowych do realizacji, każde *zdr*-te zadanie wydane do realizacji może być przedstawione w postaci wektora **WZWR**(*zdr*):

$$\begin{gathered}\mathbf{WZWR}(zdr) = < typz(zdr),\ twyd(zdr),\ ras(zdr),\ q(zdr),\\ lmp(zdr),\ lmz(zdr),\ kp(zdr),\ tu(zdr)>,\end{gathered} \tag{5.127}$$

przy czym:

– czas wydania *zdr*-tego zadania do realizacji *tgot*(*zdr*) odwzorowuje chwilę, w której zadanie zostało przydzielone do zasobu pracy i rozpoczęto jego realizację. W celu jego odwzorowania na zbiorze ***ZDR*** zadano odwzorowanie *twyd,* które przeprowadza elementy tego zbioru w elementy ze zbioru ***T***:

$$twyd : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{T}, \tag{5.128}$$

$$\forall_{zdr\,\in\,\boldsymbol{ZDR},\ t\,\in\,\boldsymbol{T}}\quad twyd\,(zdr)=t\,, \tag{5.129}$$

– zasób pracy, któremu przydzielono *zdr*-te zadanie składa się z pracowania *kp*-tej kategorii pracy oraz *tu*-tego typu urządzenia, wobec tego na potrzeby prowadzonych badań na zbiorze ***ZDR*** zadano odwzorowania *kpl* oraz *urz,* które przeprowadzają elementy tego zbioru w elementy ze zbioru ***KP*** oraz ***TU***:

$$kpl : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{PR}(kp), \tag{5.130}$$

$$urz : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{U}(tu), \tag{5.131}$$

$$\forall_{zdr\,\in\,\boldsymbol{ZDR},\ kp\in\,\boldsymbol{KP},\ pr\,\in\,\boldsymbol{PR}(kp)}\quad kpl\,(zdr)=pr\,, \tag{5.132}$$

$$\forall_{zdr\,\in\,\boldsymbol{ZDR},\ tu\,\in\,\boldsymbol{TU},\ u\,\in\,\boldsymbol{U}(tu)}\quad urz\,(zdr)=u. \tag{5.133}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Należy przy tym pamiętać, iż nie wszystkie *kp*-te kategorie pracy i nie wszystkie *tu*-te typy urządzeń umożliwiają realizację każdego *zdr*-tego zadania. Dlatego wartości jakie mogą przyjmować *kpl*(*zdr*) oraz *urz*(*zdr*) jako składowe wektorów **WZWR**(*zdr*) oraz **WZZR**(*zdr*) zależne są od:

- typu *zdr*-tego zadania *typz*(*zdr*), zakładając że *typz*(*zdr*) = *tzad, kpl*(*zdr*) = *pr* (przy czym $pr \in \boldsymbol{PR}(kp)$) oraz *urz*(*zdr*) = *u* (przy czym $u \in \boldsymbol{U}(tu)$), wymagane jest, aby odwzorowania ω2 oraz ω3 przyjmowały wartości równe jedności, tj.: ω2(*tzad, tu*) = 1 oraz ω3(*tzad, kp*) = 1;
- rodzaju asortymentu obsługiwanego w *zdr*-tym zadaniu *ras*(*zdr*), zakładając że *ras*(*zdr*) = *ra, kpl*(*zdr*) = *pr* (przy czym $pr \in \boldsymbol{PR}(kp)$) oraz *urz*(*zdr*) = *u* (przy czym $u \in \boldsymbol{U}(tu)$), wymagane jest, aby odwzorowania $\mu 1$ oraz $\mu 4$ przyjmowały wartości równe jedności, tj.: $\mu 1(tu, ra) = 1$, $\mu 3(tu, kp) = 1$;
- miejsca rozpoczęcia i zakończenia *zdr*-tego zadania *lmp*(*zdr*) oraz *lmz*(*zdr*), zakładając że *lmp*(*zdr*) = *lm, lmz*(*zdr*) = *lm*, *kpl*(*zdr*) = *pr* (przy czym $pr \in \boldsymbol{PR}(kp)$) oraz *urz*(*zdr*) = *u* (przy czym $u \in \boldsymbol{U}(tu)$), wymagane jest, aby odwzorowania $\xi 2$ oraz $\xi 3$ przyjmowały wartości równe jedności, tj.: $\xi 2(tu, lm) = 1$ oraz $\xi 3(kp, lm) = 1$;
- wykorzystywanego urządzenia *urz*(*zdr*) lub pracownika *kpl*(*zdr*), zakładając że *kpl*(*zdr*) = *pr* (przy czym $pr \in \boldsymbol{PR}(kp)$) oraz *urz*(*zdr*) = *u* (przy czym $u \in \boldsymbol{U}(tu)$), wymagane jest, aby odwzorowanie $\mu 3$ przyjmowało wartości równe jedności, tj.: $\mu 3(tu, kp) = 1$;
- wykorzystywanego urządzenia *urz*(*zdr*) lub pracownika *kpl*(*zdr*), zakładając że *kpl*(*zdr*) = *pr* (przy czym $pr \in \boldsymbol{PR}(kp)$) oraz *urz*(*zdr*) = *u* (przy czym $u \in \boldsymbol{U}(tu)$), wymagane jest, aby odwzorowanie $\mu 3$ przyjmowało wartości równe jedności, tj.: $\mu 3(tu, kp) = 1$.

Niemal każdy system informatyczny umożliwia rejestrowanie zdarzeń i zadań realizowanych w obiekcie magazynowym. Wobec tego możliwe jest odwzorowanie w modelu wektora zadań zrealizowanych **WZZR**(*zdr*), w którym zawarte zostaną dokładne informacje nt. zadania, czego dotyczyło, przez kogo było realizowane i kiedy zostało zakończone:

$$\begin{gathered}\mathbf{WZZR}(zdr) = < typz(zdr), tgot(zdr), twyd(zdr), tzak(zdr), \\ ras(zdr), q(zdr), lmp(zdr), lmz(zdr), kpl(zdr), urz(zdr)>,\end{gathered} \tag{5.134}$$

przy czym czas zakończenia realizacji *zdr*-tego zadania *tzak*(*zdr*) odwzorowuje chwilę, w której zadanie zostało zrealizowane, zakończone, a zasoby pracy mu przydzielone – zwolnione do innych zadań. W celu jego odwzorowania na zbiorze ***ZDR*** zadano odwzorowanie *tzak,* które przeprowadza elementy tego zbioru w elementy ze zbioru ***T***:

$$tzak : \boldsymbol{ZDR} \rightarrow \boldsymbol{T}, \tag{5.135}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR},\ t \in \boldsymbol{T}} \quad tzak(zdr) = t, \tag{5.136}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

5.6.2. CZAS OBSŁUGI ZADAŃ W PROCESIE MAGAZYNOWYM

Czas oczekiwania na realizację oraz czas realizacji poszczególnych zadań magazynowych może być określany na podstawie informacji zawartych w systemie informatycznym. W tym przypadku w modelu matematycznym możliwe jest wykorzystanie parametrów zestawionych w wektorze dotyczącym zadań zrealizowanych **WZZR**(*zdr*), a dokładnie *tgot*(*zdr*), *twyd*(*zdr*) oraz *tzak*(*zdr*), które określają chwile analizy, w których zadanie było gotowe do realizacji, zostało wydane do realizacji i zrealizowane.

Czas oczekiwania na realizację każdego *zdr*-tego zadania to okres czasu pomiędzy momentem, gdy zadanie było gotowe do realizacji *tgot*(*zdr*) oraz momentem, kiedy zostało ono przydzielone zasobowi pracy i rozpoczęła się jego realizacja *twyd*(*zdr*), wobec tego może być oszacowany z wykorzystaniem zależności:

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \ \Delta tocz\,(zdr) = tgot\,(zdr) - twyd\,(zdr). \tag{5.137}$$

W tym przypadku założono, że zadania przygotowywane są do wydania zgodnie z harmonogramem procesu magazynowego i w momencie ich gotowości powinny być od razu realizowane. Wobec tego czas oczekiwania powinien być jak najkrótszy. Jego wydłużenie świadczy o złej organizacji pracy obiektu magazynowego, zbyt małej liczbie pracowników i urządzeń, niskiej wydajności zasobów pracy itp.

Całkowity czas realizacji *zdr*-tego zadania to okres czasu od momentu przyjęcia zadania do realizacji przez zasób pracy do momentu zaraportowania jego zakończenia przez ten zasób, tj.:

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \ \Delta t\,(zdr) = tzak\,(zdr) - twyd\,(zdr). \tag{5.138}$$

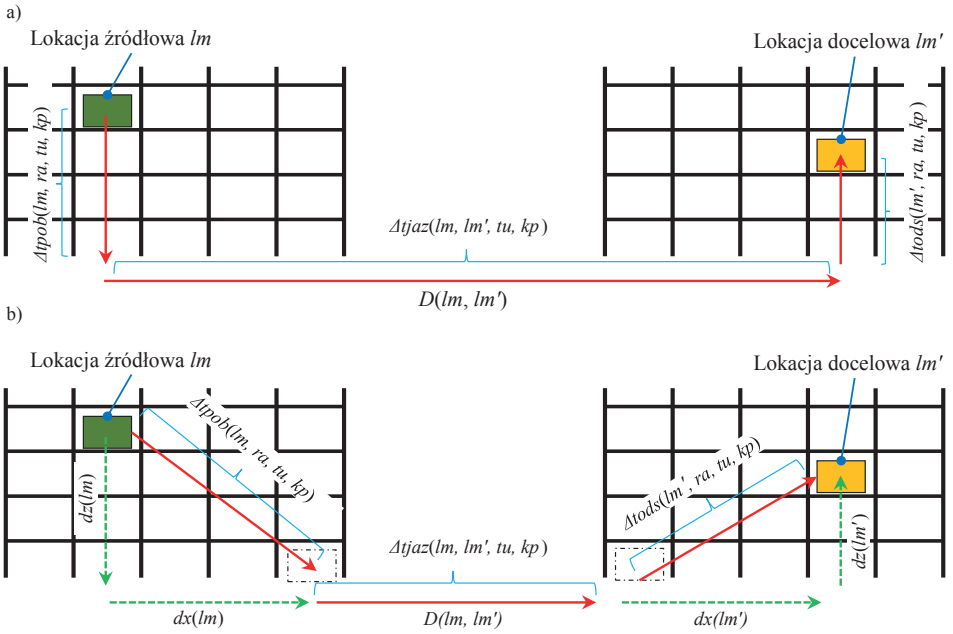
W przypadku, gdy nie ma możliwości pozyskania informacji o momentach rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych zadań niezbędne jest oszacowanie czasu trwania wszystkich wykonywanych czynności magazynowych. Czas realizacji przekształceń odwzorowywany jest za pomocą czasu przejścia przez węzły oraz łuki struktury magazynu, przy czym Δt(*lm*, *lm'*, *ra, tu*, *kp*) oznaczono jako czas przemieszczania jednostki *ra*-tego typu pomiędzy lokacjami *lm* oraz *lm'*, tj. po łuku (*lm*, *lm'*) $\in \boldsymbol{LU}$ za pomocą urządzenia *tu*-tego typu obsługiwanego przez pracownika *kp*-tej kategorii pracy. W przypadku, gdy lokacje rozpoczęcia i zakończenia przekształcenia są takie same (*lm* = *lm'*), wówczas mowa o czasie obsługi jednostki materiału *ra*-tego typu w lokacji *lm* $\in \boldsymbol{LM}$ przez urządzenie *tu*-tego typu i pracownika *kp*-tej kategorii pracy.

W przypadku analitycznego szacowania czasu operacji magazynowych Δt(*lm*, *lm'*, *ra, tu*, *kp*), należy uwzględnić wiele czynników, z których podstawowe to: pokonywana odległość (horyzontalnie i wertykalnie), prędkość przemieszczania się urządzenia i prędkość podnoszenia ładunku, czas podjęcia i odłożenia ładunku, czy też ograniczenia wynikające z pokonywania zakrętów. Wobec tego,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

na potrzeby wyznaczenia czasu realizacji poszczególnych cykli transportowych niezbędna jest znajomość wartości m.in.:

- odległość między dowolnymi dwiema lokacjami *lm* i *lm'*, tj. *D*(*lm*, *lm'*), uwzględniając układ korytarzy roboczych i wyznaczonych przez nie dróg transportu wewnętrznego (patrz rys. 5.7 oraz rys. 5.6),
- czas przemieszczania się pomiędzy *lm*-tą i *lm'*-tą lokacją za pomocą urządzenia *tu*-tego typu i pracownika *kp*-tej kategorii pracy – Δ*tjaz*(*lm*, *lm'*, *tu, kp*),
- czas pobrania jednostki *ra*-tego ładunku z lokacji *lm*-tej za pomocą urządzenia *tu*-tego typu i pracownika *kp*-tej kategorii pracy – Δ*tpob*(*lm*, *ra*, *tu, kp*),
- czas wykonania czynności związanych z przekształcaniem (obróbką, przetworzeniem) jednostki ładunku *ra*-tego typu w lokacji *lm*-tej za pomocą urządzenia *tu*-tego typu i pracownika *kp*-tej kategorii pracy – Δ*tobr*(*lm*, *ra, tu, kp*),
- czas odstawienia jednostki *ra*-tego ładunku w lokacji *lm*-tej za pomocą urządzenia *tu*-tego typu i pracownika *kp*-tej kategorii pracy – Δ*tods*(*lm*, *tu, kp*).

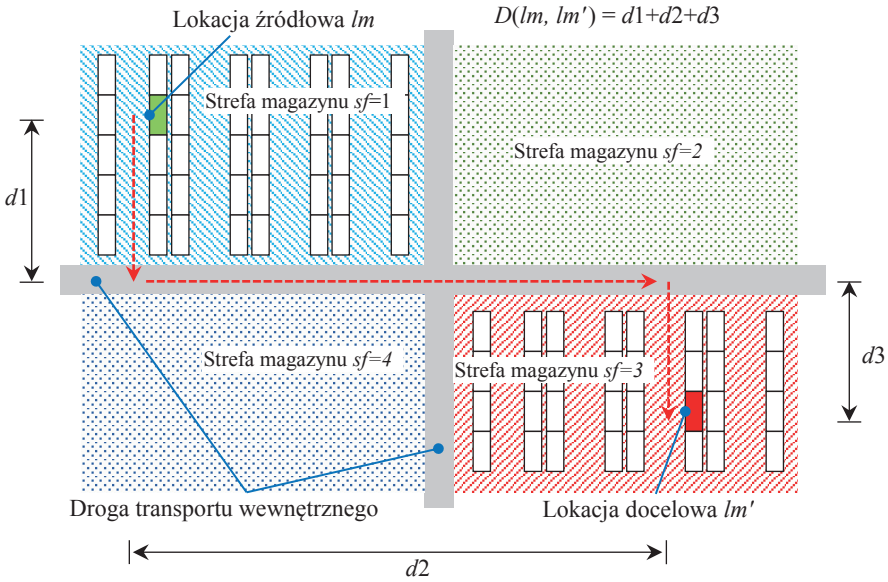


Rys. 5.6. Interpretacja drogi przejścia jednostki między lokacjami

Źródło: opracowanie własne.

W czasie Δ*tpob*(*lm*, *ra*, *tu, kp*) oraz Δ*tods*(*lm*, *tu, kp*) uwzględnia się m.in. podnoszenie i opuszczanie jednostki niezbędne do jej podjęcia i odstawienia oraz przemieszczanie się jednostki bez udziału zasobu pracy (np. przejście w regale przepływowym grawitacyjnym).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 5.7. Interpretacja drogi przejścia jednostki między lokacjami w różnych *sf*-tych strefach magazynowych, uwzględniając układ dróg transportu wewnętrznego

Źródło: opracowanie własne.

Uwzględniając powyższe, czas operacji magazynowej $\Delta t(lm, lm', ra, tu, kp)$ związanej z przemieszczaniem lub obróbką jednostki *ra*-tego rodzaju materiału pomiędzy lokacjami magazynowymi ($lm \neq lm'$) lub w *lm*-tej lokacji ($lm = lm'$) realizowanej przez zasób pracy składający się z *tu*-tego urządzenia i pracownika *kp*-tej kategorii pracy formalnie zapisano następująco:

$$\forall_{lm,lm' \in \boldsymbol{LM}:(lm,lm') \in \boldsymbol{LU},ra \in \boldsymbol{RA}:\xi 1(ra,lm)=1 \wedge \xi 1(ra,lm')=1} \forall_{tu \in \boldsymbol{TU}:\xi 2(tu,lm)=1 \wedge \xi 2(tu,lm')=1}$$
$$\forall_{kp \in \boldsymbol{KP}:\xi 3(kp,lm)=1 \wedge \xi 3(kp,lm')=1 \wedge \mu 3(tu,kp)=1} \quad \Delta t(lm,lm',ra,tu,kp) = \tag{5.139}$$
$$\Delta tpob(lm,ra,tu,kp) + \Delta tjaz(lm,lm',tu,kp) + \Delta tobr(lm,ra,tu,kp) + \Delta tods(lm,ra,tu,kp)$$

W przypadku, gdy ($lm \neq lm'$) wzór (5.139) dotyczy cyklu transportowego związanego z podjęciem jednostki w *lm*-tej lokacji, przemieszczania pomiędzy *lm*-tą i *lm'*-tą lokacją magazynową i odłożenia w *lm'*-tej lokacji. Czas obróbki materiału $\Delta tobr(lm, ra, tu, kp)$ przyjmuje zazwyczaj wartość równą zeru. Dodatkowo czas jazdy pomiędzy lokacjami $\Delta tjaz(lm, lm', tu, kp)$ uzależniony jest od prędkości poruszania się *tu*-tego urządzenia $vx(tu)$, odległości pomiędzy odwiedzanymi lokacjami $D(lm, lm')$ oraz liczby skrętów podczas jazdy $ns(lm, lm')$ prowadzących do strat czasu wynikających z redukcji prędkości poruszania się urządzenia podczas manewru skrętu:

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

$$\forall_{lm,lm' \in \mathbf{LM}:(lm,lm') \in \mathbf{LU} \wedge lm \neq lm'} \forall_{tu \in \mathbf{TU}: \xi 2(tu,lm)=1 \wedge \xi 2(tu,lm')=1} \forall_{kp \in \mathbf{KP}: \xi 3(kp,lm)=1 \wedge \xi 3(kp,lm')=1 \wedge \mu 3(tu,kp)=1}$$

$$\Delta tjaz(lm,lm',tu,kp) = \frac{D(lm,lm')}{vx(tu)} + ns(lm,lm') \cdot ts(tu) \tag{5.140}$$

Czas pobrania Δ*tpob*(*lm*, *ra*, *tu, kp*) i odstawienia Δ*tods*(*lm*, *ra, tu, kp*) jednostki materiału uzależniony jest od czynników technicznych, technologicznych oraz organizacyjnych. Wartości jakie przyjmuje mogą być różne w zależności od parametrów i możliwości wykorzystanego *tu*-tego urządzenia (np. prędkość podnoszenia, wysuwu, obrotu wideł, prędkość wysunięcia masztu), doświadczenia i umiejętności pracownika *kp*-tej kategorii pracy, *ra*-tego rodzaju asortymentu (np. wymiary, ciężar, kształt) oraz tego, w której lokacji magazynowej jest on umieszczony (np. wysokość lokacji nad posadzką, wielkość luzów manipulacyjnych w lokacji).

W większości przypadków podnoszenie wideł, wysunięcie masztu czy też podniesienie kabiny operatora do wysokości odpowiadającej *lm*-tej lokacji odbywa się podczas gdy *tu*-te urządzenie zatrzymało się przy danej lokacji. Wówczas czas poświęcony na te czynności zawiera się odpowiednio w czasie pobrania Δ*tpob*(*lm*, *ra*, *tu, kp*) i odstawienia jednostki Δ*tods*(*lm*, *ra, tu, kp*) (patrz rys. 5.6a).

Niemniej jednak w przypadku określonych typów urządzeń magazynowych (np. układnice regałowe) oraz przy długich rzędach regałowych, w celu skrócenia czasu cyklu transportowego kabina operatora (maszt i/lub widły) są podnoszone na określoną wysokość *lm*-tej lokacji (bądź opuszczane) w trakcie gdy urządzenie dociera do tego miejsca (patrz rys. 5.6b). Wówczas czas pobrania i odłożenia może być wyznaczany na podstawie zależności:

$$\forall_{lm \in \mathbf{LM}} \forall_{tu \in \mathbf{TU}: \xi 2(tu,lm)=1} \forall_{kp \in \mathbf{KP}: \xi 3(kp,lm)=1 \wedge \mu 3(tu,kp)=1}$$

$$\Delta tpob(lm,ra,tu,kp) = \max\left\{\frac{dz(lm)}{vz(tu)}, \frac{dx(lm)}{vx(tu)}\right\} \tag{5.141}$$

$$\forall_{lm \in \mathbf{LM}} \forall_{tu \in \mathbf{TU}: \xi 2(tu,lm')=1} \forall_{kp \in \mathbf{KP}: \xi 3(kp,lm')=1 \wedge \mu 3(tu,kp)=1}$$

$$\Delta tods(lm',ra,tu,kp) = \max\left\{\frac{dz(lm')}{vz(tu)}, \frac{dx(lm')}{vx(tu)}\right\} \tag{5.142}$$

W przypadku, gdy *lm* = *lm'*, operacja magazynowa wykonywana jest w *lm-tej lokacji i nie ma konieczności przemieszania materiału, tj. Δtjaz*(*lm, lm'*, *tu, kp*) = 0. Wówczas czas tej operacji będzie składał się z czasu podjęcia materiału Δ*tpob*(*lm*, *ra*, *tu, kp*), wykonania na nim czynności obróbki (np. przeformowania, ofoliowania, otagowania, zabezpieczenia) Δ*tobr*(*lm*, *ra, tu, kp*) oraz czasu odłożenia materiału Δ*tods*(*lm*, *ra*, *tu, kp*) w danej *lm*-tej lokacji.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

5.6.3. ZMIENNE DECYZYJNE I WARUNKI BRZEGOWE MODELU *MPM*

Na potrzeby opracowania modelu ***MPM*** sformułowano następujące zmienne decyzyjne:

− $xl1(ra, t, lm)$

zmienna binarna przyjmująca wartość 1 gdy do *lm*-tej lokacji w *t*-tej chwili przydzielono *ra*-ty rodzaj materiału oraz 0 w przeciwnym przypadku,

− $xq1(zdr, ra)$

zmienna odwzorowująca liczbę sztuk asortymentu *ra*-tego typu niezbędnych do obsłużenia w *zdr*-tym numerze zadania,

− $xq2(zdr, ra)$

zmienna odwzorowująca liczbę jednostek ładunkowych asortymentu *ra*-tego typu niezbędnych do obsłużenia w *zdr*-tym numerze zadania,

− $x1(zdr, ra, tu, kp)$

zmienna binarna przyjmująca wartość 1 gdy do realizacji *zdr*-tego numeru zadania dotyczącego obsługi *ra*-tego typu asortymentu przydzielono *tu*-ty typ urządzenia i pracownika *kp*-tej kategorii pracy oraz 0 w przeciwnym przypadku,

− $x2(zdr, ra, t, u, pr)$

zmienna binarna przyjmująca wartość 1 gdy do realizacji *zdr*-tego numeru zadania dotyczącego obsługi *ra*-tego typu asortymentu wydanego do realizacji w *t*-tej chwili przydzielono *u*-te urządzenie i *pr*-tego pracownika oraz 0 w przeciwnym przypadku,

− $xt1(zdr)$

zmienna o interpretacji chwili wygenerowania przez system informatyczny *zdr*-tego numeru zadania, które oczekuje na realizację,

− $xt2(zdr)$

zmienna o interpretacji chwili rozpoczęcia *zdr*-tego numeru zadania,

W celu poprawnej realizacji procesów logistycznych w obiektach magazynowych niezbędne jest spełnienie szeregu warunków i ograniczeń. Wybrane z nich przedstawiono poniżej.

Wszystkie materiały obsługiwane w obiekcie magazynowym muszą mieć przypisaną lokację, w której będą składowane lub buforowane. W przypadku, gdy w danej *t*-tej chwili są transportowane, wówczas będą one przypisane do swojej docelowej lokacji:

$$\forall_{t \in \boldsymbol{T},\, ra \in \boldsymbol{RA}: zap(ra)>0} \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}(ra)} xl1(ra,t,lm) > 0, \tag{5.143}$$

przy czym $zap(ra)$ określa zapas danego *ra*-tego rodzaju asortymentu, czyli liczbę jednostek jakie znajdują się w obiekcie magazynowym.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Każde *zdr*-te zadanie musi dotyczyć obsłużenia co najmniej jednej sztuki *ra*-tego rodzaju asortymentu, natomiast liczba obsługiwanych jednostek ładunkowych nie może być mniejsza od zera. Wobec tego muszą zostać spełnione warunki:

$$\forall_{ra \in \mathbf{RA}} \sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} xq1(zdr, ra) \geq 1 \tag{5.144}$$

$$\forall_{ra \in \mathbf{RA}} \sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} xq2(zdr, ra) \geq 0 \tag{5.145}$$

Wszystkie jednostki każdego rodzaju asortymentu dostarczane w dostawach oraz wysyłane z obiektu magazynowego w ciągu analizowanego okresu czasu powinny być przetworzone przez system informatyczny na zadania do realizacji:

$$\begin{aligned} &\forall_{ra \in \mathbf{RA}} \sum_{d \in \mathbf{D}} \sum_{ld \in \mathbf{LD}(d)} \sigma 3(ld, d, ra) \cdot q(ld,\ d) + \\ &+ \sum_{w \in \mathbf{W}} \sum_{lw \in \mathbf{LW}(w)} \sigma 4(lw, w, ra) \cdot q(lw,\ w) = \sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} xq1(zdr, ra) \end{aligned} \tag{5.146}$$

$$\forall_{ra \in \mathbf{RA}} \quad q_{we}(ra) + q_{wy}(ra) = \sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} xq1(zdr, ra) \tag{5.147}$$

$$\forall_{ra \in \mathbf{RA}} \sum_{d \in \mathbf{D}} Q(d) + \sum_{w \in \mathbf{W}} Q(w) = \sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} xq2(zdr, ra) \tag{5.148}$$

Zapełnienie poszczególnych jednostek podziału przestrzeni magazynu nie może być większe od ich maksymalnej pojemności ze względu na jednostki danego *ra*-tego rodzaju asortymentu:

$$\forall_{lm \in \mathbf{GR}} \forall_{t \in \mathbf{T}} \quad \sum_{ra \in \mathbf{RA}} Q(ra,\ lm,\ t) \leq Q_{max}(ra,\ lm) \tag{5.149}$$

$$\forall_{gr \in \mathbf{GR}} \forall_{t \in \mathbf{T}} \quad \sum_{ra \in \mathbf{RA}} Q(ra,\ gr,\ t) \leq Q_{max}(ra,\ gr) \tag{5.150}$$

$$\forall_{re \in \mathbf{RE}} \forall_{t \in \mathbf{T}} \quad \sum_{ra \in \mathbf{RA}} Q(ra,\ re,\ t) \leq Q_{max}(ra,\ re) \tag{5.151}$$

$$\forall_{pf \in \mathbf{PF}} \forall_{t \in \mathbf{T}} \quad \sum_{ra \in \mathbf{RA}} Q(ra,\ pf,\ t) \leq Q_{max}(ra,\ pf) \tag{5.152}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

$$\forall_{sf \in \boldsymbol{SF}} \forall_{t \in \boldsymbol{T}} \quad \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Q(ra,\ sf,\ t) \le Q_{max}(ra,\ sf) \tag{5.153}$$

$$\forall_{om \in \boldsymbol{OM}} \forall_{t \in \boldsymbol{T}} \quad \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Q(ra,\ om,\ t) \le Q_{max}(ra,\ om) \tag{5.154}$$

W modelu założono, że wszystkie zadania powinny zostać wygenerowane i wydane do realizacji przed zakończeniem analizowanego w badaniach okresu czasu:

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \quad xt1(zdr) \le \mathrm{card}(\boldsymbol{T}) \tag{5.155}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \quad xt2(zdr) \le \mathrm{card}(\boldsymbol{T}) \tag{5.156}$$

Dodatkowo należy pamiętać, że każde *zdr*-te zadanie powinno zakończyć się przed końcem pracy obiektu (okresem, dla którego prowadzone są badania w modelu), wobec tego:

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \quad xt1(zdr) + \Delta tocz(zdr) + \Delta t(zdr) \le \mathrm{card}(\boldsymbol{T}) \tag{5.157}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \quad xt2(zdr) + \Delta t(zdr) \le \mathrm{card}(\boldsymbol{T}) \tag{5.158}$$

Oczywiście moment wydanie zadania do realizacji nie może być wcześniejszy od momentu jego wygenerowania:

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \quad xt1(zdr) \le xt2(zdr) \tag{5.159}$$

Na potrzeby realizacji każdego *zdr*-tego zadania niezbędne jest przydzielenie do niego urządzenia odpowiedniego *tu*-tego typu oraz pracownika odpowiedniej *kp*-tej kategorii pracy. Wobec tego spełnione musi być ograniczenie dotyczące:

- możliwości obsłużenia przez zasób pracy przydzielony do *zdr*-tego zadania danego *ra*-tego rodzaju asortymentu

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR},tu \in \boldsymbol{TU},kp \in \boldsymbol{KP},ra \in \boldsymbol{RA}} \quad x1(zdr,ra,tu,kp) \cdot \mu 1(tu,ra) \cdot \mu 4(kp,ra) = 1 \tag{5.160}$$

- możliwości obsłużenia przez zasób pracy przydzielony do *zdr*-tego zadania lokacji, w której znajduje się dany *ra*-ty rodzaj asortymentu

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR},tu \in \boldsymbol{TU},kp \in \boldsymbol{KP},ra \in \boldsymbol{RA},t=xt2(zdr) \wedge t \in \boldsymbol{T}} \quad x1(zdr,ra,tu,kp) \cdot xl1(ra,t,lm) \cdot \xi 2(tu,lm) \cdot \xi 3(kp,lm) = 1 \tag{5.161}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– możliwości obsłużenia przez pracownika *kp*-tej kategorii pracy *tu*-tego urządzenia przydzielonych do *zdr*-tego zadania

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}, tu \in \boldsymbol{TU}, kp \in \boldsymbol{KP}, ra \in \boldsymbol{RA}} \quad x1(zdr, ra, tu, kp) \cdot \mu 3(tu, kp) = 1 \tag{5.162}$$

Dodatkowo do danego *zdr*-tego zadania dotyczącego obsłużenia *xq1*(*zdr*, *ra*) jednostek ładunkowych *ra*-tego typu może zostać przydzielone tylko urządzenie o ładowności większej bądź równiej wielkości zadania:

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}, tu \in \boldsymbol{TU}, kp \in \boldsymbol{KP}: \mu 3(tu, kp) = 1, ra \in \boldsymbol{RA}: \mu 4(kp, ra) = 1 \wedge \mu 1(tu, ra) = 1} \quad x1(zdr, ra, tu, kp) \cdot xq2(zdr, ra) \le qu(ra, tu) \tag{5.163}$$

Do każdego zadania przydzielane są konkretne urządzenia *u*-tego numeru i *pr*-ci pracownicy. To powoduje, że niezbędne jest spełnienie ograniczeń dotyczących:

– możliwości wydania do realizacji *zdr*-tego zadania w danej *t*-tej chwili tylko tym pracownikom i urządzeniom, które aktualnie nie wykonują innych zadań

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}, tu \in \boldsymbol{TU}, kp \in \boldsymbol{KP}, ra \in \boldsymbol{RA}, u \in \boldsymbol{U}(tu), pr \in \boldsymbol{PR}(kp), t \in \boldsymbol{T}} \quad x2(zdr, ra, t, u, pr) \cdot \mu 5(pr, t) \cdot \mu 6(u, t) = 1 \tag{5.164}$$

– możliwości przydzielenia do danego *zdr*-tego zadania tylko jednego urządzenia i pracownika (założono, że jeżeli dana czynność magazynowa wymaga do realizacji wykorzystania więcej niż jednego urządzenia i pracownika, wówczas generowane są dodatkowe numery zadań *zdr*):

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}, tu \in \boldsymbol{TU}, kp \in \boldsymbol{KP}, ra \in \boldsymbol{RA}, u \in \boldsymbol{U}(tu), t \in \boldsymbol{T}} \quad \sum_{pr \in \boldsymbol{PR}(kp)} x2(zdr, ra, t, u, pr) = 1 \tag{5.165}$$

$$\forall_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}, tu \in \boldsymbol{TU}, kp \in \boldsymbol{KP}, ra \in \boldsymbol{RA}, pr \in \boldsymbol{PR}(kp), t \in \boldsymbol{T}} \quad \sum_{u \in \boldsymbol{U}(tu)} x2(zdr, ra, t, u, pr) = 1 \tag{5.166}$$

– ograniczenia całkowitej liczby pracowników i urządzeń jakie mogą zostać przydzielone do wszystkich zadań realizowanych w danej *t*-tej chwili:
  - w przypadku gdy do obsługi *zdr*-tego zadania wykorzystywane musi być urządzenie i pracownik

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA}, t \in \boldsymbol{T}} \quad \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \sum_{u \in \boldsymbol{U}} \sum_{pr \in \boldsymbol{PR}} x2(zdr, ra, t, u, pr) \le \min\{\mathrm{card}(\boldsymbol{U}), \mathrm{card}(\boldsymbol{PR})\} \tag{5.167}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- w przypadku gdy do obsługi *zdr*-tego zadania wykorzystywane musi być tylko urządzenie bez pracownika (np. automatyczna układnica regałowa), wówczas numer pracownika *pr* zawsze przyjmuje wartość zero

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA},\, pr \in \boldsymbol{PR},\, t \in \boldsymbol{T}} \quad \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \sum_{u \in \boldsymbol{U}} x2\left(zdr, ra, t, u, pr\right) \leq \operatorname{card}\left(\boldsymbol{U}\right) \tag{5.168}$$

- w przypadku gdy do obsługi *zdr*-tego zadania wykorzystywany musi być tylko pracownik, bez konieczności angażowania urządzenia (np. prace ręczne, pakowanie, konfekcjonowanie) wówczas numer urządzenia *u* zawsze przyjmuje wartość zero

$$\forall_{ra \in \boldsymbol{RA},\, u \in \boldsymbol{U},\, t \in \boldsymbol{T}} \quad \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \sum_{pr \in \boldsymbol{PR}} x2\left(zdr, ra, t, u, pr\right) \leq \operatorname{card}\left(\boldsymbol{PR}\right) \tag{5.169}$$

5.6.4. KRYTERIA OCENY PROCESU MAGAZYNOWEGO

Ze względu na dużą różnorodność miar oceny wydajności, efektywności czy też bezpieczeństwa w procesie magazynowym istnieje wiele potencjalnych kryteriów jego oceny. W celu zachowania czytelności i jasności prowadzonych rozważań w niniejszym rozdziale sformułowane i zaprezentowane zostaną jedynie wybrane kryteria.

Zasadniczym kryterium związanym z wydajnością procesu magazynowego jest minimalizacja czasu jaki poświęcany jest na realizację wszystkich zadań magazynowych. Wobec tego minimalizowana powinna być funkcja f_1 postaci:

$$f_1 = \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} xt2\left(zdr\right) + \Delta t\left(zdr\right) \longrightarrow \min \tag{5.170}$$

jak również sumaryczny czas jaki upłynie od pojawienia się każdego *zdr*-tego zadania w systemie do momentu zakończenia jego realizacji:

$$f_2 = \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} xt1\left(zdr\right) + \Delta tocz\left(zdr\right) + \Delta t\left(zdr\right) \longrightarrow \min \tag{5.171}$$

Jeżeli jako miara wydajności procesu magazynowego przyjęta zostanie liczba sztuk wszystkich rodzajów asortymentu obsłużonych w jednostce czasu, wówczas kryterium f_3 powinno przyjmować wartości maksymalne:

$$f_3 = \frac{\sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} xq1\left(zdr, ra\right)}{\sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} xt2\left(zdr\right) + \Delta t\left(zdr\right)} \longrightarrow \max \tag{5.172}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W przypadku, gdy miara wydajności dotyczy liczby jednostek ładunkowych obsłużonych w jednostce czasu, kryterium f_3 będzie przyjmować postać:

$$f_3 = \frac{\sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} xq1(zdr, ra)}{\sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} xt2(zdr) + \Delta t(zdr)} \longrightarrow \max \tag{5.173}$$

Jeżeli jako wydajność procesu magazynowego przyjęta zostanie liczba sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jaka została pobrana w jednostce czasu, a dodatkowo uwzględniony zostanie sposób rozmieszczenia asortymentu w *lm*-tych lokacjach (patrz rozdz. 6.2), wówczas kryterium może być przedstawione w postaci:

$$f_4 = \frac{\sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \sum_{q(ra)_i \in \boldsymbol{WK}(zdr): i \in \boldsymbol{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i}{\sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \left(\frac{1}{vsx} \cdot \left(\begin{array}{l} \sum_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr): i=1 \wedge i=I} \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \left(x(ra_i, ka) \cdot D(lm) \cdot y(ka, lm) \right)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka, lm)} + \\ + \sum_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr): 1<i \le I} \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} D(lm, lm') \cdot \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{x(ra_{i-1}, ka) \cdot y(ka, lm)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka, lm)} \cdot \sum_{k \in \boldsymbol{K}} \frac{x(ra_i, ka) \cdot y(ka, lm')}{\sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} y(ka, lm')} \end{array} \right) + \right.}$$
$$\left. + \sum_{q(ra)_i \in \boldsymbol{WK}(zdr): i \in \boldsymbol{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i \right) \longrightarrow \max \tag{5.174}$$

Realizacja procesu magazynowego w każdym obiekcie powinna przebiegać w sposób umożliwiający minimalizację kosztów. Jeżeli koszty całkowite realizacji zadań magazynowych określone zostaną jako suma kosztów operacyjnych procesu magazynowego (wynikających z kosztów pracy zasobów pracy) oraz kosztów utrzymania powierzchni magazynowej niezbędnej do składowania asortymentu, wówczas kryterium f_5 powinno dążyć do minimum:

$$f_5 = ku \cdot \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka, lm) \cdot pow(lm) +$$
$$+ kgp \cdot \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \left(\frac{1}{vsx} \cdot \left(\begin{array}{l} \sum_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr): i=1 \wedge i=I} \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \left(x(ra_i, ka) \cdot D(lm) \cdot y(ka, lm) \right)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka, lm)} + \\ + \sum_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr): 1<i \le I} \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} D(lm, lm') \cdot \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{x(ra_{i-1}, ka) \cdot y(ka, lm)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka, lm)} \cdot \sum_{k \in \boldsymbol{K}} \frac{x(ra_i, ka) \cdot y(ka, lm')}{\sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} y(ka, lm')} \end{array} \right) + \right.$$
$$\left. + \sum_{q(ra)_i \in \boldsymbol{WK}(zdr): i \in \boldsymbol{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i \right) \longrightarrow \min \tag{5.175}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wydajność każdego *pr*-tego pracownika określana na podstawie liczby sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie pobrał podczas realizacji *zdr*-tych zadań i czasu realizacji wszystkich zadań powinna dążyć do maksimum:

$$\forall_{pr\in\mathbf{PR},dp\in\mathbf{DP}:dp=1} \quad f_6 = \frac{\sum_{zdr\in\mathbf{ZDR}}\sum_{lm\in\mathbf{LM}} qp(zdr,lm,ra)\cdot\theta(zdr,pr)}{\sum_{zdr\in\mathbf{ZDR}}\left(\begin{array}{l}\sum_{lm=1}^{LM}\left(\frac{x(zdr,pr,dp,lm)\cdot D(dp,lm)}{vsx(pr)}+qp(zdr,lm,ra)\cdot tpob(ra)\right)+\\ +\sum_{lm=1}^{LM}\sum_{lm'=1}^{LM}\left(\frac{x(zdr,pr,lm,lm')\cdot D(lm,lm')}{vsx(pr)}+qp(zdr,lm',ra)\cdot tpob(ra)\right)+\\ +\sum_{lm'=1}^{LM}\frac{x(zdr,pr,lm',dp)\cdot D(lm',dp)}{vsx(pr)}\end{array}\right)} \longrightarrow \max \tag{5.176}$$

Kryteria dotyczące bezpieczeństwa ze względu na specyfikę wykorzystanych tam oznaczeń i zapisów formalnych przedstawiono w rozdziale 6.4.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

6 WYBRANE MODELE PROCESÓW MAGAZYNOWYCH DOTYCZĄCE WYDAJNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA

6.1. UWAGI OGÓLNE

W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane podejścia do modelowania procesów magazynowych uwzględniające ich wydajność oraz bezpieczeństwo pracowników. W tym celu opracowano trzy niezależne modele matematyczne, które bezpośrednio uwzględniają te zagadnienia.

Pierwszy z modeli (rozdział 6.2) dotyczy poszukiwania określonego sposobu klasyfikacji dostępnego w magazynie asortymentu, a następnie jego przydziału do miejsc składowania. Jako kryterium przyjęto minimalizację niezbędnej do tego powierzchni magazynowej, kosztów jej utrzymania, a także skrócenie tras jakie pokonują pracownicy i związany z tym wzrost wydajności procesu oraz ograniczenie kosztów operacyjnych.

W kolejnym modelu (rozdział 6.3) główna uwaga skupiona została na trasach po jakich poruszają się pracownicy magazynowi podczas realizacji przydzielonych im zadań. Zasadniczym problemem w tym przypadku nie jest odnalezienie najkrótszej ścieżki pomiędzy dwoma punktami, natomiast określenie sekwencji miejsc jakie będą przez nich odwiedzane. To bowiem bezpośrednio rzutuje na długość pokonywanych przez nich tras. Ze względu na analizowany problem do jego rozwiązania wykorzystano zmodyfikowaną w tym celu wersję zagadnienia wielu komiwojażerów. Jako kryterium w modelu wykorzystano czas realizacji zadań magazynowych i związane z tym koszty. Oba kryteria były minimalizowane.

Trzeci z prezentowanych modeli (rozdział 6.4) skupia się na aspektach bezpieczeństwa w procesie magazynowym. Ze względu na to, iż jednym z najbardziej pracochłonnych, a także charakteryzujących się największą intensywnością pracy czynności magazynowych jest zazwyczaj proces komisjonowania, to jemu poświęcono w tym przypadku główną uwagę. Poszukiwano takiego wariantu organizacyjnego tego procesu i obszaru, w którym jest realizowany, dla którego wydajność kompletacji będzie największa przy jednoczesnej minimalizacji zagrożeń pracowników związanych z możliwymi kolizjami i wypadkami.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W przedstawionym w rozdziale 6.2 modelu odwzorowano metodę rozmieszczenia asortymentu wg klas. W większości przypadków ograniczają się one jedynie do trzech klas (np. ABC, XYZ), jednak w prowadzonych rozważaniach, oprócz zasadniczego przydziału artykułów do klas, uwzględniono dodatkowo problem doboru liczby klas, w których będą one grupowane.

W szeroko rozumianej problematyce wyznaczania tras (w dystrybucji, handlu, zaopatrzeniu, jak również transporcie wewnętrznym) bardzo często analizowane jest zagadnienie komiwojażera. W klasycznym podejściu do problemu komiwojażera, wszystkie miasta muszą być odwiedzone tylko raz. W przypadku procesu komisjonowania sytuacja wygląda nieco inaczej. Jedynymi miejscami, które muszą zostać odwiedzone przez kompletującego (komiwojażera) są miejsca pobrania artykułów, będących na liście kompletacyjnej. Pozostałe miejsca oferowania mogą zostać pominięte. Dodatkową różnicą jest fakt, iż dopuszczalne jest, aby te same węzły (punkty) były odwiedzone więcej niż jeden raz. Wspomniane rozbieżności odwzorowane zostały w modelu zamieszczonym w rozdziale 6.4. Sekwencja miast w tym przypadku odpowiada kolejności lokacji, w których oferowane są materiały niezbędne do pobrania i które muszą być odwiedzone przez kompletującego pracownika. Wobec tego w prezentowanym modelu wyznaczenie ścieżki kompletacji sprowadza się do określenia kolejności odwiedzania miejsc pobrań.

W idealnych systemach magazynowych i systemach komisjonowania zarówno pracownicy, jak i maszyny (wózki widłowe, kompletacyjne) oraz ładunki łączą się w jeden skoordynowany, skuteczny i bezpieczny procesu transportu wewnętrznego. Niestety, rzeczywistość nie zawsze jest tak doskonała. Należy pamiętać, że to, co rzeczywiście dzieje się, bardzo często zależy od decyzji kierownictwa obiektu logistycznego na temat jego wyposażenia, przebiegu procesów, a także zasad utrzymania bezpieczeństwa i higieny w miejscu pracy.

Przedstawione w modelu zamieszczonym w rozdziale 6.3 podejście koncentruje się głównie na prezentacji potencjalnych zagrożeń, na które mogą być narażeni pracownicy obiektów magazynowych, systemów komisjonowania itp. Zaprezentowany model matematyczny umożliwia znalezienie takich wariantów systemów komisjonowania, które będą umożliwiały realizację zarówno wydajnych, jak i bezpiecznych procesów kompletacyjnych. Zawarte w nim zależności umożliwiają estymację wydajności systemu komisjonowania i zatrudnionych w nim pracowników w postaci liczby zadań (list kompletacyjnych) zrealizowanych w jednostce czasu, oraz bezpieczeństwa określanego za pomocą wskaźnika względnego bezpieczeństwa zależnego od liczby potencjalnie niebezpiecznych dla pracowników sytuacji. Na potrzeby badań założono, że jako potencjalnie niebezpieczne sytuacje dla pracowników kompletacyjnych rozumiane będą jako sytuacje, w których w tym samym momencie i w tym samym miejscu znajdą się dwaj niezależnie kompletujący pracownicy (kompletujący z wykorzystaniem urządzeń mechanicznych, tj. wózków kompletacyjnych). Takie sytuacje mogą prowadzić bowiem do niebezpiecznych dla ludzi kolizji, wypadków i incydentów

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

mogących zagrażać ich zdrowi lub nawet życiu. Tego typu sytuacje mogą mieć miejsce np. na skrzyżowania dróg transportu wewnętrznego, skrzyżowaniach korytarzy roboczych i poprzecznych, w wąskich korytarzach kompletacyjnych, przy miejscach pobierania asortymentu, w miejscach startu i końca kompletacji.

W prezentowanym podejściu nie uwzględniono w sposób bezpośredni obowiązków pracodawców dotyczących informowania pracowników o zasadach bezpiecznej pracy. Niemniej jednak, są one niezwykle istotne ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa pracowników magazynowych. Informacje te powinny być przekazywane przed pracą, w trakcie treningów i powtarzane tak często, jak tylko jest to tylko możliwe. Pomoże to rozwijać wśród pracowników nawyki i przyzwyczajenia zwiększające bezpieczeństwo w pracy. Jest to bardzo ważne, ponieważ przyczyną wypadków w magazynach i systemach komisjonowania bardzo często jest brawura pracowników. Dlatego, aby zapewnić bezpieczeństwo w obiektach logistycznych, a tym samym przyczynić się do zmniejszenia liczby wypadków przy pracy, konieczne jest zastosowanie nie tylko zachowania ogólnych zasad bezpieczeństwa i higieny pracy, ale także całościowego, kompleksowego i spójnego podejścia do kwestii bezpieczeństwa, łącznie z problemami technicznymi i przede wszystkim odpowiedniej organizacji pracy.

6.2. MODEL ROZMIESZCZENIA ASORTYMENTU W MAGAZYNIE

Model optymalizacji rozmieszczenia asortymentu w obiekcie magazynowym z wykorzystaniem metod opartych na klasach asortymentowych może być wykorzystany do rozwiązania problemu sformułowania klas asortymentowych i przydzielenia ich do odpowiednich miejsc oferowania artykułów, w celu minimalizacji kosztów operacyjnych procesu magazynowych i kosztów utrzymania powierzchni zajmowanej przez strefę składowania, jak również maksymalizacji wydajności procesu magazynowego. Znany przy tym jest układ strefy składowania, niezbędny poziom zapasu artykułów danego rodzaju asortymentu, a także ich zapotrzebowanie w analizowanym przedziale czasu.

Na potrzeby sformułowania matematycznego modelu optymalizacji rozmieszczenia asortymentu w strefie składowania poczynione zostały następujące założenia:

- wszystkie produkty obsługiwane w magazynie są składowane i transportowane w takiej samej postaci ładunkowej (jednostkach ładunkowych paletowych, pojemnikach, kuwetach itp.);
- artykuły rozmieszczane są w strefie składowania wg metody klasowej COI;
- w obrębie klas artykuły przydzielane są wg zasady pierwszej wolnej (pustej) lokalizacji, wobec czego rozmieszczenie artykułów wewnątrz klas jest losowe;
- w każdym miejscu składowania lokowany jest tylko jeden rodzaj asortymentu;

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- w każdym *zdr*-tym zadaniu może być niezbędnych do pobrania więcej niż jedna jednostka materiału;
- w strefie składowania założono jeden punkt, w którym rozpoczynane i kończone będą poszczególne cykle transportowe.

W celu formalizacji modelu przyjęto poniższe oznaczenia:

ka – numer klasy asortymentu (***KA***={*1,2,...,ka,...,ka',...,KA*});

lm – numer miejsca składowania produktu (***LM***={*1,2,...,lm,...,lm', ...,LM*});

ra – numer typu produktu (***RA***={*1,2,...,ra,...,RA*});

pow(*lm*) – powierzchnia zajmowana przez pojedyncze miejsce składowania/ /oferowania (m^2);

COI(*ra*) – wartość parametru COI dla *ra*-tego produktu;

D(*lm*) – odległość od punktu rozpoczęcia cyklu transportowego do *lm*-tego miejsca składowania produktu;

D(*lm*, *lm'*) – odległość od *lm*-tego do *lm'*-tego miejsca składowania/oferowania;

Wp(*ra*) – całkowita liczba pobrań *ra*-tego produktu w analizowanym przedziale czasu;

Wz(*ra*) – poziom zapasu *ra*-tego produktu w analizowanym przedziale czasu;

ku – koszt utrzymania 1 m^2 powierzchni strefy komisjonowania (zł/m^2);

KU(*ka*) – koszt utrzymania powierzchni niezbędnej do składowania artykułów należących do *ka*-tej klasy (zł);

kgp – koszt pracy zasobu pracy (urządzenia i pracownika) przypadający na jedną jednostkę czasu (zł/*t*) – założono, że do zadań przydzielany jest tylko jeden *tu*-ty typ urządzeń i jedna *kp*-ta kategoria pracy ludzkiej, wobec czego koszt pracy nie jest uzależniony od *tu* oraz *kp*;

vsx – średnia prędkość z jaką porusza się zasób pracy (urządzenia i pracownika) (m/t) – założono, że do zadań przydzielany jest tylko jeden *tu*-ty typ urządzeń i jedna *kp*-ta kategoria pracy ludzkiej;

tpob(*ra*) – średni czas pobrania jednej sztuki *ra*-tego produktu z miejsca składowania;

KO – koszty operacyjne procesu magazynowego, wynikające z realizacji analizowanych zadań (zł);

KCZ – koszty całkowite realizacji zadań będące sumą kosztów operacyjnych procesu magazynowego, wynikające z realizacji analizowanych zadań oraz kosztów utrzymania powierzchni do składowania asortymentu (zł);

pow(*ra*) – powierzchnia niezbędna do składowania jednej jednostki ładunkowej *ra*-tego produktu (jednostki ładunkowej paletowej, kuwety, pojemnika itp.);

WPM – wydajność procesu magazynowego ze względu na realizację *zdr*-tych zadań;

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZDR – zbiór numerów zadań do zrealizowania w analizowanym okresie czasu;

LK(*zdr*) – wektor wierszowy z numerami produktów do pobrania w *zdr*-tym zadaniu, **LK**(*zdr*)=[ra_i], *i* – numer porządkowy warunkujący kolejność pobierania *ra*-tych produktów (*i*=1,2,...,*I*);

WK(*zdr*) – wektor wierszowy z liczbami sztuk produktów do pobrania w *zdr*-tym zadaniu, **WK**(*zdr*)=[$q(ra)_i$], *i* – numer porządkowy warunkujący kolejność pobierania *ra*-tych produktów (*i*=1,2,...,*I*).

W modelu uwzględniono binarne zmienne decyzyjne, które odwzorowują przydział poszczególnych *ra*-tych rodzajów artykułów do *ka*-tych klas asortymentu ($x(ra, ka)$), a następnie *ka*-tych klas asortymentu do *lm*-tych miejsc składowania ($y(ka, lm)$):

$$x\ ra,ka = \begin{cases} 1 \text{ jeżeli } ra\text{-ty produkt przydzielono do } ka\text{-tej klasy} \\ 0 \text{ w przeciwnym przypadku} \end{cases} \tag{6.1}$$

$$y\ ka,lm = \begin{cases} 1 \text{ jeżeli } lm\text{-tą lokacją przydzielono do } ka\text{-tej klasy} \\ 0 \text{ w przeciwnym przypadku} \end{cases} \tag{6.2}$$

Jedna z funkcji kryterium w omawianym modelu dotyczy minimalizacji sumy kosztów utrzymania powierzchni przeznaczonej na strefę komisjonowania oraz kosztów operacyjnych procesu magazynowego. Przy czym koszt utrzymania powierzchni niezbędnej do składowania artykułów należących do *ka*-tej klasy można przedstawić następująco:

$$\forall ka \in \boldsymbol{KA}\ \ KU\left(ka\right) = ku \cdot \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y\left(ka,lm\right) \cdot pow\left(lm\right) \tag{6.3}$$

Koszty operacyjne procesu magazynowego (*KO*) analizowane w modelu zależne są od jednostkowego kosztu pracy zasobu pracy oraz czasu poświęconego na realizację zadań. Czas realizacji zadań jest sumą czasu poświęconego na przemieszczanie się i pobieranie artykułów. Czas przemieszczania się na potrzeby realizacji zadań jest liniowo zależny od długości pokonywanej drogi, a także prędkości wykorzystanego wózka (*vsx*). Drogę pokonywaną podczas realizacji *zdr*-tego zadania można podzielić na trzy składowe:

- drogę z punktu startu/końca cyklu transportowego do lokalizacji zawierającej ra_i-ty produkt (przy czym *i*=1 oraz $ra_i \equiv ra$; i traktowane jest w tym przypadku jako numer porządkowy *ra*-tych numerów produktów w ***LK***(*zdr*)-tym wektorze):

$$\forall_{ra_i \in \boldsymbol{LK}\left(zdr\right):\, i=1} \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \left(x\left(ra_i,ka\right) \cdot D\left(lm\right) \cdot y\left(ka,lm\right)\right)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y\left(ka,lm\right)} \tag{6.4}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– sumę długości dróg pomiędzy lokacjami zawierającymi kolejne ra_i-te produkty zestawione w zadaniach do realizacji:

$$\sum_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr):1<i\le I} \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} D(lm,lm') \cdot \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{x(ra_{i-1},ka) \cdot y(ka,lm)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka,lm)} \cdot \sum_{k \in \boldsymbol{K}} \frac{x(ra_i,ka) \cdot y(ka,lm')}{\sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} y(ka,lm')} \quad (6.5)$$

– drogę od lokacji z ostatnim pobieranym produktem do punktu startu/końca cyklu:

$$\forall_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr):\, i=I} \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{\sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} x(ra_i,ka) \cdot y(ka,lm') \cdot D(lm')}{\sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} y(ka,lm')} \quad (6.6)$$

Pośród lokacji przydzielonych do poszczególnych klas asortymentowych artykuły rozmieszczane są losowo. Wobec tego prawdopodobieństwo odwiedzenia konkretnej *lm*-tej lokacji w celu pobrania artykułu przydzielonego do *ka*-tej klasy jest równe odwrotności liczby lokacji przeznaczonych do składowania/oferowania wszystkich artykułów z *ka*-tej klasy. W przypadku, gdy estymowana jest długość drogi pomiędzy lokacjami przeznaczonymi do składowania produktów z dwóch niezależnych klas, prawdopodobieństwo uwzględnienia konkretnej $D(lm, lm')$ odległości (przy czym $y(ka, lm)=1$, $y(ka', lm')=1$ oraz $ka \neq ka'$) jest równe iloczynowi odwrotności liczb lokacji przeznaczonych do składowania/oferowania wszystkich artykułów z *ka*-tej oraz *ka'*-tej klasy.

W niniejszym modelu czas realizacji zadań magazynowych rozumiany jest jako suma czasu poświęconego na przemieszczanie się zasobów pracy oraz czasu pobierania artykułów. Wobec tego czas ten może być przedstawiony za pomocą zależności:

– czas poświęcony na przemieszczanie się $\Delta tjazdy$

$$\Delta tjazdy = \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \frac{1}{vsx} \cdot \left(\begin{array}{l} \sum_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr):i=1 \wedge i=I} \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \left(x(ra_i,ka) \cdot D(lm) \cdot y(ka,lm) \right)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka,lm)} + \\ + \sum_{ra_i \in \boldsymbol{LK}(zdr):1<i\le I} \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} \sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} D(lm,lm') \cdot \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} \frac{x(ra_{i-1},ka) \cdot y(ka,lm)}{\sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka,lm)} \cdot \sum_{k \in \boldsymbol{K}} \frac{x(ra_i,ka) \cdot y(ka,lm')}{\sum_{lm' \in \boldsymbol{LM}} y(ka,lm')} \end{array} \right) \quad (6.7)$$

– czas poświęcony na pobieranie asortymentu $\Delta tpob$

$$\Delta tpob = \sum_{zdr \in \boldsymbol{ZDR}} \sum_{q(ra)_i \in \boldsymbol{WK}(zdr):i \in \boldsymbol{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i \quad (6.8)$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wobec tego koszty operacyjne procesu komisjonowania (*KO*) można przedstawić za pomocą zależności:

$$KO = kgp \cdot \left(\Delta tpob + \Delta jazdy \right) \tag{6.9}$$

$$KO = kgp \cdot \sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} \left(\frac{1}{vsx} \cdot \left(\sum_{ra_i \in \mathbf{LK}(zdr) \wedge i=1 \wedge i=1} \sum_{ka \in \mathbf{KA}} \frac{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} \left(x(ra_i, ka) \cdot D(lm) \cdot y(ka, lm) \right)}{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} y(ka, lm)} + \right. \right.$$
$$\left. \left. + \sum_{ra_i \in \mathbf{LK}(zdr) \wedge 1 < i \leq I} \sum_{lm \in \mathbf{LM}} \sum_{lm' \in \mathbf{LM}} D(lm, lm') \cdot \sum_{ka \in \mathbf{KA}} \frac{x(ra_{i-1}, ka) \cdot y(ka, lm)}{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} y(ka, lm)} \cdot \sum_{k \in \mathbf{K}} \frac{x(ra_i, ka) \cdot y(ka, lm')}{\sum_{lm' \in \mathbf{LM}} y(ka, lm')} \right) + \right.$$
$$\left. + \sum_{q(ra)_i \in \mathbf{WK}(zdr) \wedge i \in \mathbf{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i \right) \tag{6.10}$$

Koszty całkowite realizacji zadań (*KCZ*), będące sumą kosztów operacyjnych procesu magazynowego, wynikające z realizacji analizowanych zadań oraz kosztów utrzymania powierzchni do składowania asortymentu przyjmowały postać:

$$KCZ = KU + KO \tag{6.11}$$

$$KCZ = ku \cdot \sum_{ka \in \mathbf{KA}} \sum_{lm \in \mathbf{LM}} y(ka, lm) \cdot pow(lm) +$$
$$+ kgp \cdot \sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} \left(\frac{1}{vsx} \cdot \left(\sum_{ra_i \in \mathbf{LK}(zdr) \wedge i=1 \wedge i=1} \sum_{ka \in \mathbf{KA}} \frac{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} \left(x(ra_i, ka) \cdot D(lm) \cdot y(ka, lm) \right)}{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} y(ka, lm)} + \right. \right.$$
$$\left. \left. + \sum_{ra_i \in \mathbf{LK}(zdr) \wedge 1 < i \leq I} \sum_{lm \in \mathbf{LM}} \sum_{lm' \in \mathbf{LM}} D(lm, lm') \cdot \sum_{ka \in \mathbf{KA}} \frac{x(ra_{i-1}, ka) \cdot y(ka, lm)}{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} y(ka, lm)} \cdot \sum_{k \in \mathbf{K}} \frac{x(ra_i, ka) \cdot y(ka, lm')}{\sum_{lm' \in \mathbf{LM}} y(ka, lm')} \right) + \right.$$
$$\left. + \sum_{q(ra)_i \in \mathbf{WK}(zdr) \wedge i \in \mathbf{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i \right) \tag{6.12}$$

Dodatkowo, jeżeli jako wydajność procesu magazynowego przyjęta zostanie liczba sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jaka została pobrana w jednostce czasu, wówczas wydajność ta może być przedstawiona w postaci:

$$WPM = \frac{\sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} \sum_{q(ra)_i \in \mathbf{WK}(zdr) \wedge i \in \mathbf{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i}{\sum_{zdr \in \mathbf{ZDR}} \left(\frac{1}{vsx} \cdot \left(\sum_{ra_i \in \mathbf{LK}(zdr) \wedge i=1 \wedge i=1} \sum_{ka \in \mathbf{KA}} \frac{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} \left(x(ra_i, ka) \cdot D(lm) \cdot y(ka, lm) \right)}{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} y(ka, lm)} + \right. \right.$$
$$\left. \left. + \sum_{ra_i \in \mathbf{LK}(zdr) \wedge 1 < i \leq I} \sum_{lm \in \mathbf{LM}} \sum_{lm' \in \mathbf{LM}} D(lm, lm') \cdot \sum_{ka \in \mathbf{KA}} \frac{x(ra_{i-1}, ka) \cdot y(ka, lm)}{\sum_{lm \in \mathbf{LM}} y(ka, lm)} \cdot \sum_{k \in \mathbf{K}} \frac{x(ra_i, ka) \cdot y(ka, lm')}{\sum_{lm' \in \mathbf{LM}} y(ka, lm')} \right) + \right.$$
$$\left. + \sum_{q(ra)_i \in \mathbf{WK}(zdr) \wedge i \in \mathbf{I}} tpob(ra) \cdot q(ra)_i \right) \tag{6.13}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Zasadnym jest, aby poszukiwać takich rozwiązań, dla których wydajność procesu magazynowego będzie największa, natomiast koszty całkowite realizacji zadań będą minimalizowane. Wobec tego w przedstawianym modelu sformułowano dwa kryteria: wydajności $f_1(x(ra, ka), y(ka, lm))$ oraz kosztów $f_2(x(ra, ka), y(ka, lm))$:

$$f_1\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right) = WPM \tag{6.14}$$

$$f_1\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right) \longrightarrow \max \tag{6.15}$$

$$f_2\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right) = KCZ \tag{6.16}$$

$$f_2\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right) \longrightarrow \min \tag{6.17}$$

gdzie kryteria $f_1(x(ra, ka), y(ka, lm))$ i $f_1(x(ra, ka), y(ka, lm))$ traktowane są jako kryteria cząstkowe, będące składowymi funkcji $F(x(ra, ka), y(ka, lm))$:

$$F\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right) = F\left[f_1\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right), f_2\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right)\right] \tag{6.18}$$

Dodatkowo, należy określić wagę poszczególnych kryteriów w wyborze najlepszego wariantu analizowanego problemu:

$$F\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right) = \sum_{kc=1}^{2} w_{kc} \cdot f_{kc}\left(x\left(ra,\ ka\right), y\left(ka,\ lm\right)\right) \tag{6.19}$$

gdzie kc określa numer cząstkowego kryterium, natomiast w_k oznacza wagę kc-tego kryterium cząstkowego $w_{kc} \in \{0, 1\}, \sum_{kc=1}^{2} w_{kc} = 1$.

W celu uzyskania prawidłowych rozwiązań w modelu spełnione powinny zostać ograniczenia przedstawione i omówione poniżej.

Ograniczenia numer (6.20) oraz (6.21) gwarantują, iż jeśli ra-ty produkt o niższej wartości parametru COI został przydzielony do ka-tej klasy, a ra'-ty produkt o wyższej wartości tego parametru do ka'-tej klasy, wówczas klasa ka-ta zostanie przydzielona do miejsc składowania/oferowania zlokalizowanych bliżej punktu startu/końca niż klasa ka'-ta.

$$\forall\ ra, ra' \in \mathbf{RA} : ra \neq ra'; ka, ka' \in \mathbf{KA} : ka < ka' \quad COI\left(ra\right) \cdot x\left(ra,\ ka\right) \leq COI\left(ra'\right) \cdot x\left(ra',\ ka'\right) \tag{6.20}$$

$$\forall lm, lm' \in \mathbf{LM} : lm \neq lm'; ka, ka' \in \mathbf{KA} : ka < ka' \quad D\left(lm\right) \cdot y\left(ka,\ lm\right) \leq D\left(lm'\right) \cdot y\left(ka',\ lm'\right) \tag{6.21}$$

Dodatkowo ograniczenie (6.22) uniemożliwia przydzielenie lm-tej lokalizacji do więcej niż jednej klasy, natomiast ograniczenie (6.23) nie pozwala na

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

przydzielenie *ra*-tego produktu do dokładnie jednej klasy. Dodatkowo do każdej *ka*-tej klasy musi być przydzielona co najmniej jedna lokalizacja (6.24).

$$\forall lm \in \boldsymbol{LM} \quad \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} y(ka,\ lm) \leq 1 \tag{6.22}$$

$$\forall ra \in \boldsymbol{RA} \quad \sum_{ka \in \boldsymbol{KA}} x(ra,\ ka) = 1 \tag{6.23}$$

$$\forall ka \in \boldsymbol{KA} \quad \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka,\ lm) \geq 1 \tag{6.24}$$

W kolejnym ograniczeniu uwzględniono warunek gwarantujący, że w strefie składowania jest wystarczająco miejsca do składowania wszystkich przydzielonych *ra*-tych produktów.

$$\forall ka \in \boldsymbol{KA} \quad \sum_{ra \in \boldsymbol{RA}} Wz(ra) \cdot pow(ra) \cdot x(ra,\ ka) \leq \sum_{lm \in \boldsymbol{LM}} y(ka,\ lm) \cdot pow(lm) \tag{6.25}$$

Wartość parametru *COI*(*ra*) dla każdego *ra*-tego typu produktu, na podstawie którego produkty przydzielane są do odpowiednich *ka*-tych klas, szacowana jest na podstawie zależności:

$$\forall ra \in \boldsymbol{RA} \quad COI(ra) = pow(lm) \cdot \frac{Wz(ra)}{Wp(ra)} \tag{6.26}$$

Dwa ostatnie ograniczenia dotyczą binarnego charakteru zmiennych decyzyjnych:

$$\forall ra \in \boldsymbol{RA}, ka \in \boldsymbol{KA} \quad x(ra,\ ka) \in \{0,1\} \tag{6.27}$$

$$\forall lm \in \boldsymbol{LM}, ka \in \boldsymbol{KA} \quad y(ka,\ lm) \in \{0,1\} \tag{6.28}$$

6.3. MODEL OPTYMALIZACJI TRAS PRACOWNIKÓW

W celu sformułowania problemu komiwojażera w odniesieniu do procesu komisjonowania należy odwzorować strefę kompletacji w postaci grafu. Wobec tego jako ***PK*** oznaczono zbiór numerów początków korytarzy roboczych (od czoła strefy), tj.:

$$\boldsymbol{PK} = \{1, 2, ..., pk, ..., PK\} \tag{6.29}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Jako ***KK*** oznaczono zbiór numerów końców korytarzy roboczych (od czoła strefy), tj.:

$$\boldsymbol{KK} = \{1, 2, ..., kk, ..., KK\} \tag{6.30}$$

Ponadto zdefiniowano zbiór ***LM***, będący zbiorem numerów lokacji magazynowych, w których oferowane są artykuły do kompletacji. Miejsca te są niezbędne do odwiedzenia podczas realizacji zadania kompletacyjnego, tj. zbiór postaci:

$$\boldsymbol{LM} = \{1, 2, ..., lm, ..., LM\} \tag{6.31}$$

Założono również, że w analizowanej strefie kompletacji możliwych jest *DP* sposobów zlokalizowania punktu zdawczo-pobraniowego, czyli miejsca, w którym rozpoczyna i kończy się proces kompletacji. Zbiór wszystkich możliwych lokalizacji zapisano jako zbiór ***DP*** postaci:

$$\boldsymbol{DP} = \{0, 1, ..., dp, ..., DP\} \tag{6.32}$$

W ten sposób strukturę strefy komisjonowania można zapisać w postaci grafu:

$$\boldsymbol{G} = \langle \boldsymbol{W}, \boldsymbol{L} \rangle \tag{6.33}$$

gdzie jako ***W*** oznaczono zbiór wierzchołków grafu ***G***, natomiast jako ***L*** zbiór krawędzi tegoż grafu, przy czym:

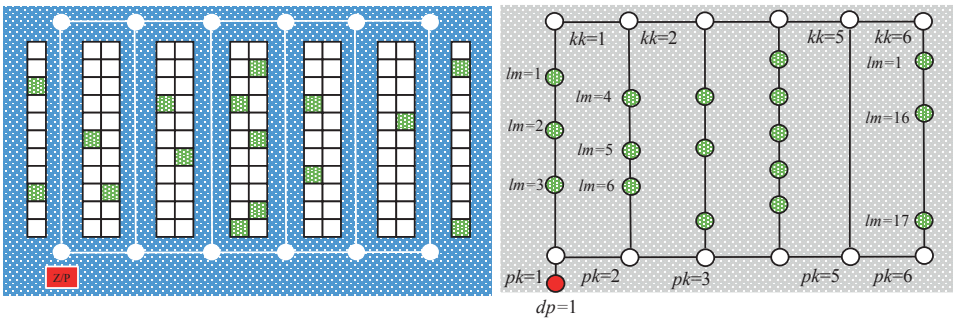
$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{PK} \cup \boldsymbol{KK} \cup \boldsymbol{LM} \cup \boldsymbol{DP} \tag{6.34}$$

$$\boldsymbol{L} \subset \boldsymbol{W} \times \boldsymbol{W} \tag{6.35}$$

Przykład strefy komisjonowania wraz z zaznaczonymi miejscami pobrań, odwzorowanej grafem ***G***, przedstawiono na rys. 6.1.

W przypadku modelowania procesu komisjonowania nie wszystkie węzły odwzorowane w strefie składowania muszą być odwiedzone przez kompletujących. W rzeczywistości będą to tylko te miejsca, w których należy pobrać jakiekolwiek jednostki asortymentowe oraz dodatkowo punkt zdawczo-pobraniowy. Pozostałe węzły, pomimo iż są połączeniami korytarzy roboczych i korytarzy poprzecznych mogą (ale nie muszą) być elementami ścieżek kompletacyjnych. Uzależnione jest to od liczby miejsc pobrań i korytarzy roboczych niezbędnych do odwiedzenia w pojedynczym cyklu kompletacyjnym. To z kolei zależy od zamówień klientów napływających do obiektu magazynowego, wielkości zapotrzebowania na dany *ra*-ty rodzaju asortymentu oraz jego rozmieszczenia w poszczególnych *lm*-tych miejscach oferowania.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 6.1. Strefa kompletacji wraz z zaznaczonymi miejscami pobrań oraz jej odwzorowanie za pomocą grafu

Źródło: opracowanie własne.

W celu opracowania formalnego zapisu problemu poszukiwania ścieżek po jakich będą poruszać się pracownicy magazynowi wykorzystano zagadnienie wielu komiwojażerów. Wobec tego niezbędne było przyjęcie szeregu założeń dotyczących tego, iż:

- w strefie komisjonowania oferowanych jest *RA* rodzajów asortymentu, przy czym *ra* jest numerem rodzaju asortymentu,
- każdy *ra*-ty rodzaj asortymentu charakteryzuje się określoną wagą (*wg*(*ra*)) i objętością (*obj*(*ra*)),
- proces komisjonowania będzie rozpoczynał się i kończył w tym samym *dp*-tym punkcie zdawczo-pobraniowym (obwód hamiltonowski),
- proces komisjonowania realizuje *PR* pracowników, przy czym *pr* jest numerem pracownika oraz $pr \in \boldsymbol{PR}$,
- każdy *pr*-ty pracownik pobiera jednostki asortymentu do pojemnika, kuwety lub palety o określonej objętości (*objp*) i ładowności (*wgp*),
- każdej *lm*-tej lokacji, jaka musi zostać odwiedzona przez pracowników, zadano charakterystykę *qp*(*zdr*, *lm*, *ra*) odwzorowującą liczbę sztuk *ra*-tego typu asortymentu jaką należy pobrać z *lm*-tej lokacji w celu realizację *zdr*-tego zadania (*zdr*-te zadanie może być traktowane w tym przypadku jako numer listy kompletacyjnej),
- na realizację procesu kompletacji przeznaczony jest określony czas dysponowany *T*, którego nieprzekroczenie umożliwi wysłanie skompletowanych jednostek do klientów, przy czym *t* jest numerem chwili analizy oraz $t \in \boldsymbol{T}$ oraz $T = \text{card}(\boldsymbol{T})$,
- odległość pomiędzy *lm*-tą i *lm'*-tą lokacją oznaczono jako *D*(*lm*, *lm'*),
- średnią prędkość z jaką porusza się *pr*-ty zasób pracy (urządzenie i pracownik) oznaczono jako *vsx*(*pr*),
- średni czas pobrania jednej sztuki *ra*-tego produktu z miejsca składowania oznaczono jako *tpob*(*ra*).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Jako zmienną decyzyjną założono zmienną binarną przyjmującą wartość 1 jeżeli *pr*-ty pracownik podczas realizacji *zdr*-tego zadania przemieszcza się pomiędzy *lm*-tą i *lm'*-tą lokacją, w przeciwnym przypadku zmienna przyjmuje wartość 0:

$$x(zdr, pr, lm, lm') = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{6.36}$$

Jako kryterium przyjęto funkcję odwzorowującą całkowitą długość drogi jaką pokonują wszyscy pracownicy podczas realizacji wszystkich *zdr*-tych zadań magazynowych (zadań kompletacji). Oczywiście powinna ona dążyć do minimum:

$$\forall_{dp\in \mathbf{DP}:dp=1} \; F_1(X) = \sum_{pr=1}^{PR}\sum_{zdr=1}^{ZDR}\left(\begin{array}{l}\sum_{lm=1}^{LM} D(dp,lm)\cdot x(zdr,pr,dp,lm) + \\ \sum_{lm=1}^{LM}\sum_{lm'=1}^{LM} D(lm,lm')\cdot x(zdr,pr,lm,lm') + \sum_{lm'=1}^{LM} D(lm',dp)\cdot x(zdr,pr,lm',dp)\end{array}\right) \to \min \tag{6.37}$$

Dodatkowo spełnione muszą zostać następujące warunki:

- każdy pracownik podczas realizacji *zdr*-tego zadania kompletacyjnego odwiedza tylko raz każde znajdujące się w tym zadaniu miejsce pobrań:

$$\forall_{dp\in \mathbf{DP}:dp=1, zdr\in \mathbf{ZDR}, pr\in \mathbf{PR}, lm\in \mathbf{LM}} \sum_{lm'=1}^{LM} x(zdr, pr, dp, lm') + \sum_{lm'=1}^{LM} x(zdr, pr, lm, lm') = 1 \tag{6.38}$$

- wszyscy pracownicy rozpoczynają i kończą swoje trasy w *dp*-tym punkcie zdawczo-pobraniowym:

$$\forall_{dp\in \mathbf{DP}:dp=1, zdr\in \mathbf{ZDR}, pr\in \mathbf{PR}} \sum_{lm=1}^{LM} x(zdr, pr, dp, lm) = \sum_{lm'=1}^{LM} x(zdr, pr, lm', dp) = 1 \tag{6.39}$$

- pojemność i ładowność pojemników kompletacyjnych nie może być przekroczona:

$$\forall_{zdr\in \mathbf{ZDR}, pr\in \mathbf{PR}} \sum_{ra=1}^{RA}\sum_{lm=1}^{LM} qp(zdr, lm, ra)\cdot wg(ra)\cdot \sum_{lm'=1}^{LM} x(zdr, pr, lm, lm') \le wgp \tag{6.40}$$

$$\forall_{zdr\in \mathbf{ZDR}, pr\in \mathbf{PR}} \sum_{ra=1}^{RA}\sum_{lm=1}^{LM} qp(zdr, lm, ra)\cdot obj(ra)\cdot \sum_{lm'=1}^{LM} x(zdr, pr, lm, lm') \le objp \tag{6.41}$$

- czas kompletacji przez poszczególnych pracowników nie może przekraczać założonych ram czasowych:

$$\forall_{pr\in \mathbf{PR}, dp\in \mathbf{DP}:dp=1} \sum_{zdr\in \mathbf{ZDR}} \left(\begin{array}{l}\sum_{lm=1}^{LM}\left(\frac{x(zdr,pr,dp,lm)\cdot D(dp,lm)}{vsx(pr)} + qp(zdr,lm,ra)\cdot tpob(ra)\right) + \\ + \sum_{lm=1}^{LM}\sum_{lm'=1}^{LM}\left(\frac{x(zdr,pr,lm,lm')\cdot D(lm,lm')}{vsx(pr)} + qp(zdr,lm',ra)\cdot tpob(ra)\right) + \\ + \sum_{lm'=1}^{LM}\frac{x(zdr,pr,lm',dp)\cdot D(lm',dp)}{vsx(pr)}\end{array}\right) \le T \tag{6.42}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Funkcja kryterium, odwzorowująca wydajność każdego *pr*-tego pracownika określana na podstawie liczby sztuk *ra*-tego rodzaju asortymentu jakie pobrał podczas realizacji *zdr*-tych zadań i czasu realizacji wszystkich zadań dąży do maksimum:

$$\forall_{pr\in \mathbf{PR},dp\in \mathbf{DP}\cdot dp=1} F_2(X)=\frac{\sum_{zdr\in \mathbf{ZDR}}\sum_{lm\in \mathbf{LM}} qp(zdr,lm,ra)\cdot\theta(zdr,pr)}{\sum_{zdr\in \mathbf{ZDR}}\left(\begin{array}{l}\sum_{lm=1}^{LM}\left(\frac{x(zdr,pr,dp,lm)\cdot D(dp,lm)}{vsx(pr)}+qp(zdr,lm,ra)\cdot tpob(ra)\right)+\\ +\sum_{lm=1}^{LM}\sum_{lm'=1}^{LM}\left(\frac{x(zdr,pr,lm,lm')\cdot D(lm,lm')}{vsx(pr)}+qp(zdr,lm',ra)\cdot tpob(ra)\right)+\\ +\sum_{lm'=1}^{LM}\frac{x(zdr,pr,lm',dp)\cdot D(lm',dp)}{vsx(pr)}\end{array}\right)}\longrightarrow \max \tag{6.43}$$

przy czym $\theta(zdr, pr)$ przyjmuje wartość równą jedności w przypadku, gdy *pr*-ty pracownik realizował *zdr*-te zadanie oraz wartość zerwo w przeciwnym przypadku.

6.4. MODEL OCENY BEZPIECZEŃSTWA W OBIEKTACH MAGAZYNOWYCH

Na potrzeby matematycznego sformułowania problemu dotyczącego ukształtowania i organizacji procesu komisjonowania w obiekcie magazynowym w sposób umożliwiający maksymalizację wydajności pracy magazynu oraz bezpieczeństwa jego pracowników założono, iż dane są następujące zbiory:

- ***LA*** – zbiór numerów układów strefy kompletacji (gdzie *la* jest numerem układu strefy kompletacji $la \in \mathbf{LA}$),
- ***RO*** – zbiór numerów metod generowania tras kompletacji (gdzie *ro* jest numerem metody trasowania $ro \in \mathbf{RO}$),
- ***SA*** – zbiór numerów metod rozmieszczania asortymentu (gdzie *sa* jest numerem metody rozmieszczenia asortymentu, $sa \in \mathbf{SA}$),
- ***PR*** – zbiór numerów pracowników kompletacyjnych (gdzie *pr* jest numerem pracownika i $pr \in \mathbf{PR}$),
- ***ZDR*** – zbiór numerów zadań do realizacji (list kompletacyjnych) (gdzie *zdr* jest numerem listy kompletacyjnej oraz $zdr \in \mathbf{ZDR}$),
- ***ZDR***(*pr*) – zbiór numerów zadań przydzielonych *pr*-temu pracownikowi,
- ***PP*** – zbiór numerów obszarów, na które podzielona została strefa kompletacji (gdzie *pp* jest numerem miejsca i $pp \in \mathbf{PP}$),
- ***T*** – zbiór numerów chwil kompletacji (przy czym *t* jest numerem chwili kompletacji, $t \in \mathbf{T}$).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W opracowanym modelu założono, że wariant ukształtowania i organizacji systemu komisjonowania będzie przedstawiony jako określona kombinacja takich elementów, jak: układ strefy komisjonowania ($la \in \boldsymbol{LA}$), metoda generowania trasy kompletacji ($ro \in \boldsymbol{RO}$), metoda rozmieszczenia asortymentu ($as \in \boldsymbol{AS}$). Układ strefy dotyczy doboru rodzajów regałów, określenia długości i liczby rzędów regałowych, a także liczby korytarzy roboczych i korytarzy poprzecznych. W przyjętym *la*-tym układzie rozmieszczany jest asortyment wg określonej *sa*-tej metody, czyli jednostki materiałowe oferowane podczas kompletacji przydzielane są do konkretnych miejsc składowania. Następnie na podstawie informacji o zapotrzebowaniu klientów generowane są *zdr*-te zadania (listy kompletacyjne), przydzielane poszczególnym *pr*-tym pracownikom, którzy realizują je, przemieszczając się po strefie kompletacji według tras ustalonych na podstawie przyjętej *ro*-tej metody.

Wobec tego, w celu odnalezienia najlepszego pod względem przyjętych kryteriów wariantu ukształtowania i organizacji systemu komisjonowania przyjęto zmienną decyzyjną $xo(la, sa, ro)$ o wartości 1, jeżeli w systemie komisjonowania wykorzystano *la*-ty układ strefy, *sa*-ty sposób rozmieszczenia asortymentu oraz *ro*-tą metodę generowania tras pracowników oraz 0 w przeciwnym przypadku:

$$xo\left(la, sa, ro\right) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{6.44}$$

Proces kompletacji w obiektach logistycznych może być realizowany przez jednego lub więcej pracowników. Dlatego przed jego rozpoczęciem należy poszczególne *zdr*-te zadania (listy kompletacyjne) przydzielić poszczególnym pracownikom. Na potrzeby odwzorowania powyższego założono, że zmienna decyzyjna $\zeta(zdr, pr)$:

$$\zeta\left(zdr, pr\right) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{6.45}$$

przyjmuje wartość 1 wtedy i tylko wtedy, jeżeli *zdr*-ta lista kompletacyjna została przydzielona *pr*-temu pracownikowi. W przeciwnym przypadku $\zeta(zdr, pr)=0$.

Dodatkowo na potrzeby prowadzonych badań założono, że proces kompletacji podzielony został na T chwil. Dla każdej t-tej chwili ($t \in \boldsymbol{T}$) stan systemu komisjonowania może być sprawdzony oraz określone (wyznaczone) charakterystyki zachodzącego w nim procesu. Dodatkowo, na potrzeby estymacji długości trwania procesu kompletacji realizowanego przez więcej niż jednego pracownika równocześnie niezbędnym było odwzorowanie chwil rozpoczęcia i zakończenia przez nich zbierania każdej z list. Dlatego zadano funkcje:

- *tstart* (t, *pr*, *zdr*, *la*, *sa*, *ro*) – przyjmującą wartość 1, jeżeli w *t*-tej chwili rozpoczęte zostało *zdr*-te zadanie przez *pr*-tego pracownika, przy czym organizacja systemu komisjonowania charakteryzowała się *la*-tym układem strefy, *sa*-tym sposobem rozmieszczenia asortymentu oraz *ro*-tą metodą generowania tras pracowników oraz 0 w przeciwnym przypadku;

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

– *tend* (t, pr, zdr, la, sa, ro) – przyjmującą wartość 1, jeżeli w *t*-tej chwili zakończone zostało *zdr*-te zadanie przez *pr*-tego pracownika, przy czym organizacja systemu komisjonowania charakteryzowała się *la*-tym układem strefy, *sa*-tym sposobem rozmieszczenia asortymentu oraz *ro*-tą metodą generowania tras pracowników oraz 0 w przeciwnym przypadku.

Wówczas czas trwania procesu kompletacji potrzebny na realizację wszystkich zleceń można zapisać jako:

$$\begin{aligned}&\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}}\ \Delta tkom(la,sa,ro)=\\&\max_{pr\in \mathbf{PR},zdr\in \mathbf{ZDR}(pr),t\in \mathbf{T}}\left\{t\cdot tend\left(t,pr,zdr,la,sa,ro\right)\cdot\zeta\left(zdr,pr\right)\cdot xo\left(la,sa,ro\right)\right\}-\\&\min_{pr\in \mathbf{PR},zdr\in \mathbf{ZDR}(pr),t\in \mathbf{T}}\left\{t\cdot tstart\left(t,pr,zdr,la,sa,ro\right)\cdot\zeta\left(zdr,pr\right)\cdot xo\left(la,sa,ro\right)\right\}\end{aligned}\tag{6.46}$$

Wydajność procesu kompletacji, mierzona liczbą zadań zrealizowanych w jednostce czasu, może zostać oszacowana na podstawie zależności:

$$\begin{aligned}&\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}}\ Wk(la,sa,ro)=\\&\frac{\sum_{pr\in \mathbf{PR}}\sum_{zdr\in \mathbf{ZDR}(pr)}\zeta(zdr,pr)}{\max_{pr\in \mathbf{PR},zdr\in \mathbf{ZDR}(pr),t\in \mathbf{T}}\left\{t\cdot tend\left(t,pr,zdr,la,sa,ro\right)\cdot\zeta\left(zdr,pr\right)\cdot xo\left(la,sa,ro\right)\right\}-\min_{pr\in \mathbf{PR},zdr\in \mathbf{ZDR}(pr),t\in \mathbf{T}}\left\{t\cdot tstart\left(t,pr,zdr,la,sa,ro\right)\cdot\zeta\left(zdr,pr\right)\cdot xo\left(la,sa,ro\right)\right\}}\end{aligned}\tag{6.47}$$

Na potrzeby oszacowania bezpieczeństwa pracowników w modelu systemie komisjonowania założono funkcję ψ (pp,t,la,sa,ro). Przyjmowane przez nią wartości umożliwiają odwzorowanie pojawienia się potencjalnie niebezpiecznych sytuacji w *pp*-tym miejscu, *t*-tej chwili i określonym wariancie systemu komisjonowania. Funkcja ta przyjmuje wartości binarne:

$$\forall_{pp\in \mathbf{PP},t\in \mathbf{T},la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}}$$
$$\psi\left(pp,t,la,sa,ro\right)=\begin{cases}1 & \text{jeżeli } \sum_{op\in \mathbf{OP}}\gamma(pp,t,pr,la,sa,ro)\geq 2\\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku}\end{cases}\tag{6.48}$$

gdzie γ (pp,t,pr,la,sa,ro) jest funkcją przyjmującą wartość 1 wtedy i tylko wtedy, gdy w danym wariancie systemu komisjonowania, w *pp*-tym miejscu w strefie kompletacji i w *t*-tej chwili procesu znajduje się *pr*-ty zasób pracy:

$$\forall_{pp\in \mathbf{PP},t\in \mathbf{T},pr\in \mathbf{PR},la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}}\quad \gamma(pp,t,pr,la,sa,ro)=\begin{cases}1\\0\end{cases}\tag{6.49}$$

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Pracownicy (wózki) poruszające się po obszarze transportu wewnętrznego wykonują określone, przydzielone im zadania. Zadania te realizowane są równocześnie przez wielu operatorów (wózków). Wobec tego może dojść do interakcji pomiędzy nimi, tj. ich kontaktu w trakcie wykonywania zadań. Kontakt wózków rozumiany jest jako pojawienie się co najmniej dwóch środków transportu wewnętrznego w tym samym miejscu i w tej samej chwili. W wyniku tego może dojść do sytuacji kolizyjnej. Sytuacja kolizyjna traktowana jest jako sytuacja potencjalnie niebezpieczna, czyli taka, w wyniku której może dojść do wypadku, zderzenia się wózków oraz wynikających z tego urazów, utraty zdrowia i życia ich operatorów. W tym przypadku istotne jest również odpowiednie podzielenie przestrzeni roboczej na *pp*-te obszary. Należy zwrócić szczególną uwagę na wielkość tych obszarów i wynikającą z tego gęstość podziału powierzchni roboczej. Im bardziej szczegółowy podział, tym większa złożoność obliczeniowa modelu. Wobec tego w modelu przyjęto, iż *pp*-te obszary będą kwadratami o długości boku równej podwójnej długości drogi hamowania, zależnej od przyjętego do badań typu urządzenia i maksymalnej prędkości jaką ono osiąga.

Liczba potencjalnie niebezpiecznych dla pracowników sytuacji (wynikających z możliwej kolizji wózków kompletacyjnych) w danym wariancie systemu komisjonowania ($SPN(la, sa, ro)$) może być oszacowana w następujący sposób:

$$\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}} \quad SPN(la,sa,ro) = \sum_{pp\in \mathbf{PP}} \sum_{t\in \mathbf{T}} \psi(pp,t,la,sa,ro) \qquad (6.50)$$

Dodatkowo należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, iż bardzo istotny jest podział czasu dysponowanego przeznaczonego na proces kompletacji na przedziały (chwile t) o odpowiedniej długości. Każda potencjalnie niebezpieczna sytuacja trwa przez pewien określony czas (twa określoną liczbę chwil t). Jeżeli podział czasu dysponowanego dla kompletacji będzie zbyt szczegółowy, liczba oszacowanych potencjalnie niebezpiecznych sytuacji będzie zawyżona, gdyż sumowane będą również chwile, w których sytuacja ta trwała. W przeciwnym przypadku, gdy podział czasu dysponowanego będzie zbyt ogólny (mała liczba długich przedziałów czasu), może dojść do pominięcia potencjalnie niebezpiecznej sytuacji.

Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych $SPN(la, sa, ro)$ nie określa bezpośrednio poziomu bezpieczeństwa w systemie komisjonowania, ale na potrzeby badań założono, iż jest ona ściśle z nim skorelowana. Wraz ze wzrostem liczby takich sytuacji wzrasta również ryzyko kolizji, wypadku, urazu pracownika, więc poziom bezpieczeństwa w systemie komisjonowania maleje. Wobec tego podczas projektowania i kształtowania systemów komisjonowania należy dążyć do minimalizacji liczby potencjalnie niebezpiecznych sytuacji.

Jak wspomniano wcześniej, szacowana liczba potencjalnie niebezpiecznych sytuacji zależy od sposobu podziału czasu dysponowanego kompletacji, ale także od długości samego procesu kompletacji. Inaczej bowiem należałoby ocenić poziom

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

bezpieczeństwa w systemie komisjonowania, w którym zidentyfikowano pięć sytuacji (chwil) potencjalnie niebezpiecznych podczas kompletacji podzielonej na 500 „chwil" niż w systemie, w którym zidentyfikowano pięć sytuacji (chwil) potencjalnie niebezpiecznych podczas kompletacji trwającej 1000 „chwil". Wobec tego, w celu umożliwienia miarodajnego porównania poziomu bezpieczeństwa w różnych wariantach systemu komisjonowania zaproponowano tzw. wskaźnik względnego bezpieczeństwa *WWB*(*la*, *sa*, *ro*). Wskaźnik ten jest stosunkiem liczby potencjalnie niebezpiecznych sytuacji do liczby wszystkich chwil, w którym analizowany był proces kompletacji (card(***T***)):

$$\forall_{la\in \boldsymbol{LA},sa\in \boldsymbol{SA},ro\in \boldsymbol{RO}} \quad WWB(la,\ sa,\ ro)=\frac{PDS(la,\ sa,\ ro)}{\mathrm{card}(\boldsymbol{T})} \tag{6.51}$$

Zapisując liczbę potencjalnie niebezpiecznych sytuacji jako sumę chwil, w jakich one zachodziły, wskaźnik *WWB*(*la, sa, ro*) przyjmuje postać:

$$\forall_{la\in \boldsymbol{LA},sa\in \boldsymbol{SA},ro\in \boldsymbol{RO}} \quad WWB(la,sa,ro)=\sum_{pp\in \boldsymbol{PP}}\frac{\sum_{t\in \boldsymbol{T}}\psi(pp,t,la,sa,ro)}{\mathrm{card}(\boldsymbol{T})} \tag{6.52}$$

Wobec powyższego, im mniejsza wartość wskaźnika względnego bezpieczeństwa, tym większy przewidywany poziom bezpieczeństwa w systemie komisjonowania.

Na potrzeby oceny poszczególnych wariantów systemu komisjonowania pod względem ich usprawnienia, znalezienia newralgicznych z punktu widzenia bezpieczeństwa obszarów stref komisjonowania itp., użyteczny może być również wskaźnik ω (*pp*,*la*,*sa*,*ro*):

$$\forall_{pv\in \boldsymbol{PV},la\in \boldsymbol{LA},sa\in \boldsymbol{SA},ro\in \boldsymbol{RO}} \quad \omega(pp,la,sa,ro)=\sum_{t\in \boldsymbol{T}}\psi(pp,t,la,sa,ro) \tag{6.53}$$

Z jego wykorzystaniem możliwe jest oszacowanie liczby potencjalnie niebezpiecznych sytuacji w konkretnych *pp*-tych obszarach strefy komisjonowania. Na potrzeby porównania różnych wariantów systemu komisjonowania, ale charakteryzujących się takim samym układem strefy, możliwa jest modyfikacja wskaźnika ω(*pp*, *la*, *sa*, *ro*), uwzględniająca długość procesu kompletacji w danym wariancie:

$$\forall_{pp\in \boldsymbol{PP},la\in \boldsymbol{LA}:la=0,sa\in \boldsymbol{SA},ro\in \boldsymbol{RO}} \quad \omega(pp,la,sa,ro)=\frac{\sum_{t\in \boldsymbol{T}}\psi(pp,t,la,sa,ro)}{\mathrm{card}(\boldsymbol{T})} \tag{6.54}$$

Analiza wartości wskaźnika ω(*pp*, *la*, *sa*, *ro*) może doprowadzić do odnalezienia obszarów strefy komisjonowania w poszczególnych wariantach systemu,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

w których ryzyko kolizji lub wypadku jest największe. W takim przypadku liczba takich miejsc powinna zostać ograniczana poprzez odpowiednią reorganizację systemu komisjonowania.

Projektując systemy komisjonowania powinno się poszukiwać takich ich wariantów, dla których wydajność procesu kompletacji i bezpieczeństwo pracowników jest największe. Wówczas w przedstawianym modelu należałoby sformułować dwa kryteria: wydajności $f_1(la, sa, ro)$ oraz bezpieczeństwa $f_2(la, sa, ro)$:

$$\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}} \quad f_1(la,sa,ro) = Wk(la,sa,ro) \tag{6.55}$$

$$\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}} \quad f_1(la,sa,ro) \longrightarrow \max \tag{6.56}$$

$$\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}} \quad f_2(la,sa,ro) = WWB(la,sa,ro) \tag{6.57}$$

$$\forall pv \in \mathbf{PV} \quad f_2(la,sa,ro) \longrightarrow \min \tag{6.58}$$

gdzie kryteria $f_1(la, sa, ro)$ i $f_2(la, sa, ro)$ traktowane są jako kryteria cząstkowe, będące składowymi funkcji $F(la, sa, ro)$:

$$\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}} \quad F(la,\ sa,\ ro) = F\left[f_1(la,\ sa,\ ro), f_2(la,\ sa,\ ro)\right] \tag{6.59}$$

Określenie wag poszczególnych kryteriów (kc) dodatkowo umożliwi odnalezienie z wykorzystaniem modelu takich wariantu systemu komisjonowania, w których zostanie zachowany określony balans pomiędzy ich wydajnością i poziomem bezpieczeństwa:

$$\forall_{la\in \mathbf{LA},sa\in \mathbf{SA},ro\in \mathbf{RO}} \quad F(la,sa,ro) = \sum_{kc=1}^{2} w_{kc} f_{kc}(la,sa,ro) \tag{6.60}$$

gdzie kc określa numer cząstkowego kryterium, natomiast w_k oznacza wagę kc-tego kryterium cząstkowego $w_{kc} \in \{0, 1\}, \sum_{kc=1}^{2} w_{kc} = 1$.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

7 METODY SYMULACYJNE W OCENIE PROCESÓW MAGAZYNOWYCH

7.1. WPROWADZENIE DO METOD SYMULACYJNYCH

7.1.1. SYMULACJA A MODEL SYMULACYJNY

Pojęcie symulacji stosowane jest już od dziesięcioleci. Po raz pierwszy w cywilnym zastosowaniu wykorzystane ono zostało na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Wówczas w pracach badawczych nastąpiło przejście od analizy jedynie poszczególnych fragmentów badanych zagadnień do rozpatrywania wzajemnych powiązań pomiędzy nimi. Podyktowane to było głównie pojawieniem się elektronicznych maszyn cyfrowych, które wykorzystywane były do wykonywania pierwszych eksperymentów symulacyjnych. To spowodowało, iż dzięki symulacji możliwe stało się badanie złożonych systemów, wobec których metody analityczne okazywały się niemożliwe do zastosowania.

W literaturze odnaleźć można wiele różnych definicji symulacji. Poniżej przedstawiono wybrane z nich, które wskazują, iż jest to:

- technika numeryczna służąca do prowadzenia eksperymentów na modelach matematycznych, które opisują zachowanie się systemów w czasie [105],
- technika numeryczna służąca do dokonywania eksperymentów na pewnych rodzajach modeli matematycznych, które opisują przy pomocy maszyny cyfrowej zachowanie się złożonego systemu w ciągu długiego okresu czasu [204], [205],
- naśladowanie za pomocą modelu jakiegoś rzeczywistego procesu lub efektu albo odtwarzanie jakiegoś układu istniejącego w rzeczywistości [242],
- odtworzenie systemu wraz z jego własnościami dynamicznymi i towarzyszącymi procesami w postaci modelu, na którym można przeprowadzać eksperymenty prowadzące do wyników, przydatnych do oceny zachowania systemu rzeczywistego [290].

Jeżeli symulacja wykonywana jest z wykorzystaniem komputera (co jest bardzo częstą sytuacją), to mamy do czynienia z *symulacją komputerową*, którą

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

można zdefiniować jako metodę badania, naśladowania lub odtwarzania systemu rzeczywistego lub teoretycznego polegającą na zbudowaniu modelu systemu i jego implementacji komputerowej, a następnie eksperymentowaniu na modelu i analizie uzyskanych wyników [189].

Jak już wspomniano, symulacja często wykorzystywana jest do badania różnego rodzaju systemów. Dlatego również należy zdefiniować pojęcie *symulacji systemów*, która może być określana jako:
- technika rozwiązywania problemów polegająca na śledzeniu w czasie zmian zachodzących w dynamicznym modelu systemu [88],
- zastosowanie modelu systemu w celu chronologicznego wygenerowania historii stanów tegoż modelu, która jest uważana za historię stanów modelowanego systemu [70],
- czynność przedstawiania systemu za pomocą modelu symbolicznego, którym można łatwo operować i na podstawie którego otrzymujemy wyniki numeryczne [80].

Eksperymenty symulacyjne wykonywane są z wykorzystaniem *modeli symulacyjnych*. Należy przy tym rozróżnić pojęcie modelu formalnego (zazwyczaj matematycznego) od modelu symulacyjnego. Model formalny jest elementem składowym modelu symulacyjnego, w skład którego wchodzi:
- model formalny procesu funkcjonowania systemu,
- plan przeprowadzania eksperymentów,
- sposób opracowania wyników eksperymentu.

Wobec tego, odnosząc się do przytoczonej wcześniej definicji symulacji można stwierdzić, iż za pomocą modelu symulacyjnego możliwe jest:
- naśladowanie różnego rodzaju procesów, np.: produkcyjnych, transportowych, magazynowych,
- określanie efektów wynikających z podjętych decyzji, np. decyzji technicznych (zmiana liczby lub rodzajów wyposażenia mechanicznego obiektu magazynowego), ekonomicznych (zwiększenie liczby pracowników magazynowych i ich stawek godzinowych w zamian za wprowadzenie automatyzacji procesu), organizacyjnych (zmiana organizacji ruchu w magazynie, zwiększenie dopuszczalnej prędkości poruszania się wózków, zmiana harmonogramu procy obiektu),
- odtwarzanie układów istniejących w przedsiębiorstwie w celu ich zbadania.

7.1.2. WADY I ZALETY SYMULACJI

Metody symulacyjne jak każde inne posiadają wady i zalety. Do zasadniczych *zalet* wykorzystania *symulacji komputerowej* należy zaliczyć [80], [135]:

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- badania na modelu systemu są zazwyczaj znacząco tańsze niż na systemie rzeczywistym, przy czym badania na systemie rzeczywistym mogą w ogóle nie być możliwe,
- możliwość odwzorowywania i badania długookresowych zachowowań systemów (np. kilku dni, miesięcy bądź lat ich działania), w ciągu kilku minut, a nawet sekund,
- możliwość odwzorowywania i badania działań systemów i związanych z tym zjawisk, które przebiegają na tyle szybko, iż nie ma możliwości analizy ich w czasie rzeczywistym,
- możliwość odtworzenia stanu systemu (np. ze zbioru danych o systemie zidentyfikowanych i zapisanych wcześniej), co umożliwia kontynuację przerwanego eksperymentu,
- umożliwiają powtarzalność eksperymentów (wielokrotne przeprowadzenie eksperymentu przy tych samych danych wejściowych i w tych samych warunkach),
- złożoność algorytmu symulacji funkcjonowania systemu w niewielkim stopniu wpływa na możliwość realizacji jego badań, może jedynie wydłużyć czas trwania eksperymentu,
- algorytm symulacji w łatwy sposób można modyfikować, co umożliwia wykorzystanie tych metod do badania systemów różnych klas bez znaczących nakładów,
- uzyskuje się zadowalającą adekwatność modelu symulacyjnego w stosunku do badanego systemu, a wynika to głównie ze znajomości zasad funkcjonowania systemu, a nie ze stosowanych narzędzi programistycznych,
- symulacja dostarcza odpowiedzi na pytanie *co, jeśli*?, eksperymenty symulacyjne umożliwiają analizę różnych możliwości decyzyjnych,
- symulacja pozwala na analizę współzależności efektów składowych zmiennych modelu mających wpływ na wybór decyzji w warunkach ekstremalnych.

Jako główne *wady symulacji komputerowej* należy wymienić [135], [220]:

- uzyskiwanie często jedynie oszacowań interesujących badacza charakterystyk systemu,
- brak formalnych metod tworzenia modeli symulacyjnych,
- skomplikowane badania adekwatności modelu symulacyjnego,
- możliwość pojawienia się trudnych do wykrycia błędów systematycznych wynikających ze złego kodowania programów symulacyjnych, błędnych generatorów liczb pseudolosowych itp.,
- modele symulacyjne mogą wymagać dużych nakładów finansowych, a ich przygotowanie zabiera dużo czasu,
- modele symulacyjne dają odpowiedzi na pytania odnoszące się do konkretnych zmiennych warunków; badacz przygotowujący decyzje musi uwzględnić wszystkie uwarunkowania i ograniczenia analizowanych wariantów decyzyjnych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wymienione powyżej wady okazały się na tyle nieistotne (w stosunku do zidentyfikowanych zalet), że od lat pięćdziesiątych metody symulacyjne były dynamicznie rozwijane, a współcześnie są one stosowane w niemal każdym obszarze badawczym (w tym oczywiście również w obszarach transportu wewnętrznego i magazynowania).

7.2. KONSTRUOWANIE MODELI SYMULACYJNYCH

Ze względu na złożoność problemu, konstruowanie modeli symulacyjnych jest wieloetapową procedurą, na którą składają się następujące kroki [135]:
- zrozumienie modelowanego systemu, sformułowanie problemu i określenie celów modelowania,
- budowa modelu koncepcyjnego, sformułowanie reprezentacji modelu,
- translacja koncepcji na określony język symulacji (odwzorowanie w narzędziu),
- weryfikacja (testowanie) modelu oraz jego walidacja,
- projektowanie eksperymentów symulacyjnych,
- realizacja eksperymentów symulacyjnych,
- opracowanie, analiza i dokumentacja wyników,
- implementacja rozwiązań.

Iteracyjny charakter procedury konstruowania modeli symulacyjnych z wyróżnieniem kolejnych jej etapów przedstawiono na rys. 7.1.

Sformułowanie problemu i ustalenie celu modelowania

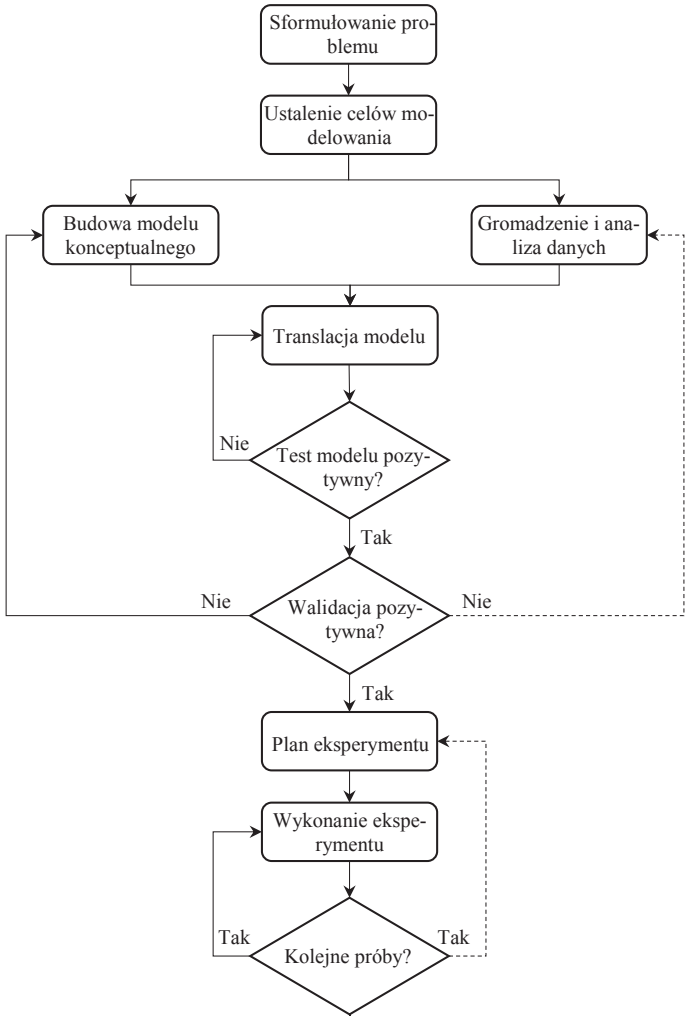
Pierwszym krokiem budowy modelu symulacyjnego dowolnego systemu powinno być szczegółowe jego poznanie, a następnie wyznaczenie celu (bądź też celów) modelowania. Istotne w tym przypadku jest poprawne zidentyfikowanie granic pomiędzy odwzorowywanym systemem a jego otoczeniem, a także określenie, które relacje są istotne z punktu widzenie funkcjonowania modelu (jak również celu modelowania), a które można pominąć, upraszczając tym samym model. Na tym etapie ważne jest również określenie wejść i wyjść z systemu oraz selekcja jego parametrów i zmiennych.

Budowa modelu koncepcyjnego

Budowa modelu koncepcyjnego sprowadza się zazwyczaj do określenia jakościowej i ilościowej struktury (statycznej i dynamicznej) modelu odwzorowywanego systemu. Co ważne, na tym etapie niezbędne jest określenie stopnia szczegółowości modelu. Stopień szczegółowości powinien uwzględniać podstawowy cel modelowania. Należy przy tym pamiętać, iż zbyt duża szczegółowość może zwiększać złożoność obliczeniową modelu i znacząco wydłużać prowadzone eksperymenty symulacyjne. Ze względu na iteracyjny charakter modelowania

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

symulacyjnego złożoność i szczegółowość modeli rośnie etapowo, a badania rozpoczyna się od modelu najprostszego i najmniej szczegółowego.



Rys. 7.1. Etapy modelowania symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [16], [135].

Analiza i przygotowanie danych

Z punktu widzenia prowadzenia badań symulacyjnych bardzo istotne jest poprawne przygotowanie danych wejściowych, które następnie będą przetwarzane na określone, poszukiwane podczas analiz parametry i charakterystyki systemu. Dane te przygotowywane są na podstawie informacji pochodzących z istniejącego systemu bądź też opracowywane są na podstawie rozważań teoretycznych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Niemniej jednak w większości przypadków tylko część z nich może zostać wykorzystana bezpośrednio do badań. Pozostałe dane muszą zostać odpowiednio przetworzone i poddane szczegółowym analizom przez badacza. Następnie na ich podstawie określane są teoretyczne i empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa, które wykorzystywane są do generowania liczb pseudolosowych na potrzeby eksperymentów symulacyjnych. Rodzaj oraz ilość potrzebnych danych określa się zazwyczaj na podstawie przyjętego celu badań.

Translacja modelu

Translacja modelu oznacza przetworzenie go do formy akceptowalnej dla maszyn cyfrowych. W większości przypadków sprowadza się to do zapisania i zaimplementowania modelu w określonym (wybranym przez badacza) języku programowania, języku symulacji czy też skonstruowania modelu w dedykowanym środowisku symulacyjnym dostępnym na rynku.

Weryfikacja i walidacja modelu

Ten etap konstruowania modelu symulacyjnego ma na celu ocenę opracowanego modelu na podstawie porównania go z jego rzeczywistym odpowiednikiem. Etap ten wymaga również określenia kryteriów i mierników, na podstawie których będzie możliwe sklasyfikowanie modelu jako poprawny bądź też niepoprawny. Należy przy tym rozróżnić pojęcie walidacji i weryfikacji. Weryfikacja traktowana jest jako sprawdzenie czy skonstruowany model jest wystarczająco trafnym odwzorowaniem modelu koncepcyjnego. Natomiast walidacja dotyczy stwierdzenia czy działanie modelu jest poprawne, zasadne i zgodne z celem modelowania. Wobec tego, weryfikacja modelu symulacyjnego oraz jego implementacji polega na logicznym sprawdzeniu zapisu matematycznego oraz jego odwzorowania w programie, który wykorzystywany jest do budowy modelu komputerowego. Sprowadza się to zazwyczaj do poszukiwania błędów w implementacji komputerowej modelu oraz błędów odwzorowania modelu powstałych w wyniku jego przekształcenia w postać komputerową. Istnieje wiele technik weryfikacji, do których można zaliczyć chociażby konsultacje z ekspertem, budowę schematów logicznych czy wykorzystanie interaktywnego debuggera. Walidacja jest sprawdzeniem dopasowania modelu symulacyjnego do obiektu/procesu rzeczywistego, który jest przedmiotem symulacji. Sprawdzanie to odbywa się poprzez tzw. kalibrację modelu, wielokrotne eksperymenty na modelu i ich porównanie z działaniem obiektu rzeczywistego oraz uwzględnianiu różnic w ich działaniu. Walidacja modelu powinna być planowana już na etapie budowy modelu i realizowana do czasu jej zakończenia [112], [135].

Planowanie eksperymentów symulacyjnych

Planowanie eksperymentów symulacyjnych dotyczy opracowania scenariuszy realizowanych badań. Związane jest to z określeniem parametrów, dla których będą prowadzone analizy. Mogą to być zarówno parametry wejściowe, jak

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

i wyjściowe oraz stałe opisujące modelowane procesy i systemy. Opracowane scenariusze powinny umożliwiać uzyskanie jak największej liczby poszukiwanych informacji, parametrów i charakterystyk systemu przy jednocześnie najmniejszych możliwych nakładach obliczeniowych.

Wykonanie eksperymentów symulacyjnych

Ten etap polega na przeprowadzeniu badań symulacyjnych wg wcześniej zaplanowanych eksperymentów i scenariuszy oraz z wykorzystaniem przygotowanego uprzednio modelu. W zależności od wybranego języka programowania czy też środowiska symulacyjnego krok ten może mieć różnorodny przebieg.

Dokumentacja i raportowanie wyników

Po przeprowadzeniu eksperymentów symulacyjnych niezbędne jest odpowiednie przetworzenie i zarchiwizowanie uzyskanych wyników. Dlatego na tym etapie generowana jest dokumentacja dotycząca zastosowania i wykorzystania opracowanego modelu symulacyjnego oraz raporty określające przebieg wykonanych podczas badań eksperymentów. Na podstawie wygenerowanej dokumentacji badacz (decydent) będzie podejmował odpowiednie decyzje. Wobec tego opracowana dokumentacja powinna być przygotowana w sposób jasny, czytelny, zwięzły i użyteczny dla odbiorcy.

Implementacja rozwiązania

Implementacja rozwiązania jest ostatnim etapem badań symulacyjnych i dotyczy przeniesienia uzyskanych w efekcie eksperymentów wyników do systemu rzeczywistego. Sukces tego etapu, czyli poprawne działanie rzeczywistego systemu po wdrożeniach, jest uwarunkowany prawidłowym przebiegiem wszystkich poprzednich etapów konstruowania modelu symulacyjnego.

7.3. NARZĘDZIA DO SYMULACJI PROCESÓW MAGAZYNOWYCH

Modele symulacyjne stosowane są najczęściej tam, gdzie trudno jest uzyskać analityczne rozwiązanie analizowanego problemu. Taka sytuacja bardzo często ma miejsce w przypadku badań dotyczących systemów magazynowych i realizowanych w nich procesów, które zazwyczaj dotyczą złożonych problemów związanych np. z optymalizacją: czasu poświęcanego na obsługę zamówień klientów, poziomu zapasu i wydajności procesu magazynowego, kosztów operacyjnych i eksploatacyjnych obiektu, harmonogramowania i organizacji pracy, a także maksymalizację poziomu bezpieczeństwa pracowników. Bez wykorzystania badań symulacyjnych rozwiązanie tych problemów ze względu na ich złożoność i dynamikę zachodzących zmian bardzo często byłoby bardzo trudne, a nawet

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

niemożliwe. Dlatego metody i narzędzia symulacyjne od wielu lat z powodzeniem stosowane są do prowadzenia badań związanych z problematyką procesów magazynowych.

Decydując się na wykorzystanie metod symulacyjnych każdy badacz musi dokonać również wyboru odpowiedniego narzędzia do badań symulacyjnych. Jest to bardzo ważne, ponieważ wybór ten warunkuje kształt i przebieg projektu symulacyjnego. W symulacji procesów magazynowych (oraz szeroko rozumianych procesów logistycznych) najczęściej wykorzystywane są cztery grupy narzędzi symulacyjnych:

- języki programowania ogólnego przeznaczenia (np. C#, C, Pascal, Java, Visual Basic),
- specjalistyczne języki symulacyjne (np. SIMSCRIPT, SLX, SIMULA, GPSS),
- specjalistyczne pakiety symulacyjne (np. ARENA, DOSIMIS-3, AUTOMOD, SIMPRO, SIMPROCESS, PROMODEL czy FLEXSIM),
- arkusze kalkulacyjne (zazwyczaj pakiet Microsoft Excel wspomagany przez VBA umożliwiający automatyzację pracy z modelem).

Porównanie wyżej wymienionych klas narzędzi symulacyjnych ze względu na wybrane cechy przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Porównanie głównych klas narzędzi symulacyjnych ze względu na wybrane cechy

Cecha	Arkusze kalkulacyjne	Języki programowania ogólnego przeznaczenia	Specjalistyczne języki symulacyjne	Specjalistyczne pakiety symulacyjne
Cena	niska	niska	średnia	wysoka
Czas budowy modelu	średni	długi	średni	krótki
Czas uczenia się	krótki	długi	średni	średni
Elastyczność modelowania	mała	wysoka	średnia	średnia lub wysoka
Łatwość użycia	średnia	niska	średnia	wysoka
Łatwość walidacji i testowania	niska	wysoka	średnia	średnia lub wysoka
Szybkość pracy	niska	wysoka	średnia	średnia
Zakres zastosowań	wąski	szeroki	średni	średni

Źródło: opracowanie własne na podstawie [135], [254].

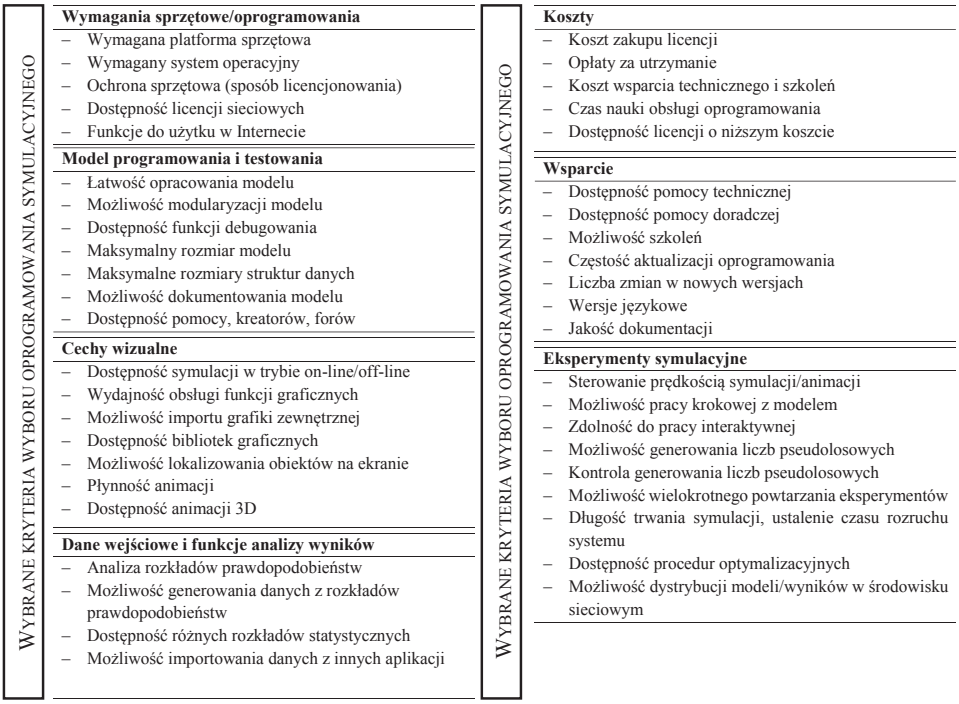
Ze względu na wysoką łatwość użycia i krótki czas budowy modelu współcześnie do badań procesów magazynowych najchętniej przez badaczy wykorzystywane są specjalistyczne pakiety symulacyjne. Duża łatwość ich uczenia się

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

powoduje, że ich użytkownikami mogą być nie tylko specjaliści z zakresu programowania, ale również osoby, które na co dzień nie zajmują się zaawansowanymi językami programowania i technikami informatycznymi.

Na rynku dostępnych jest bardzo wiele różnych rodzajów tego typu oprogramowania. Umożliwiają one odwzorowanie niemal każdego systemu i algorytmu jego działania występującego w rzeczywistości. Dodatkowo umożliwiają one wykorzystanie generatorów liczb pseudolosowych oraz komunikację z zewnętrznymi bazami danych.

Ze względu na różnorodność dostępnych narzędzi symulacyjnych oraz oferowanych przez nie funkcjonalności badacze zmuszeniu są do wyboru takiego pakietu, który będzie spełniał ich indywidualne oczekiwania oraz umożliwiał realizację celu badań w sposób szybki i efektywny. Przykłady kryteriów, którymi najczęściej kierują się badacze podczas wyboru narzędzia symulacyjnego, przedstawiono na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Wybrane kryteria wyboru oprogramowania symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [135], [254], [284].

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

8 BADANIA SYMULACYJNE PROCESÓW MAGAZYNOWYCH W ASPEKCIE WYDAJNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA – *CASE STUDY*

8.1. ZAŁOŻENIA DO BADAŃ SYMULACYJNYCH

Od dłuższego czasu klaruje się trend prowadzący do minimalizacji powierzchni magazynowych, zwiększania regularności dostaw i wysyłek (np. części i wyrobów gotowych). Spowodowało to znaczny wzrost znaczenia transportu wewnętrznego. Potrzeba szybkiego rozładunku, dostarczania wyrobów na stanowiska pracy, konieczność szybkiego przygotowania wysyłek do klientów wymagają zastosowania większej liczby środków transportowych. Niewielkie powierzchnie magazynowe, wypełnione towarami, poruszającymi się wózkami, oraz towarzyszący temu ruch pieszy wpływają w znacznym stopniu na zwiększenie zagrożeń występujących w transporcie wewnętrznym.

Wobec powyższego oraz na podstawie analizy możliwych wypadków w obiektach logistycznych (przedstawionych w rozdziale 4.4) założono, że na potrzeby modelowania i oceny bezpieczeństwa pracowników magazynowych w niniejszym przykładzie główna uwaga zwrócona zostanie na niebezpieczeństwo związane z pracą operatorów wózków magazynowych. Jak wspomniano w poprzednich rozdziałach, praca operatorów wózków magazynowych związana jest z wieloma niebezpieczeństwami. Może dojść do różnego rodzaju zderzeń, wypadków, najechania innych pracowników itp. To z kolei może prowadzić do poważnych urazów ciała i zdrowia operatorów wózków magazynowych i pracowników magazynowych.

Na potrzeby prowadzonych rozważań założono, że oceny bezpieczeństwa pracowników magazynowych można dokonać z wykorzystaniem modelowania symulacyjnego. W tym celu opracowano modele symulacyjne różnych wariantów organizacyjnych układów transportu wewnętrznego (wybranych obszarów funkcjonalnych obiektów magazynowych). W tych układach symulowano pracę wózków widłowych.

W przygotowanych modelach symulacyjnych do podstawowych zadań operatorów wózków należy wprowadzenie jednostek magazynowych do strefy rezerw

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

(podjęcie jednostek ładunkowych w wydzielonej strefie buforowej, przewóz do strefy regałowej, odłożenie jednostki do regału) oraz wyprowadzenie jednostek ładunkowych do strefy buforowej na wyjściu z układu transportu wewnętrznego (podjęcie jednostek ładunkowych z wybranego regału, przewóz do wydzielonej strefy buforowej na wyjściu z układu, odłożenie jednostki do buforowania na wyjściu). Wykorzystane wózki mają takie same parametry i charakterystyki (np. prędkość jazdy, czas przyśpieszania, hamowania, prędkość podnoszenia wideł, pobierania, odkładania jednostek). Do wyszukiwania ścieżek transportowych wg których będę poruszały się wózki wykorzystany będzie algorytm A*.

Wózki poruszające się po obszarze transportu wewnętrznego wykonują określone, przydzielone im zadania. Zadania te realizowane są równocześnie przez różnych operatorów (różne wózki). Wobec tego może dojść do bezpośrednich interakcji pomiędzy nimi, tj. na przykład przecięcia się ich trajektorii ruchu. Jeżeli takie zdarzenia będą zachodzić dla co najmniej dwóch pojazdów w tej samej chwili może dojść do sytuacji kolizyjnej. Sytuacja kolizyjna w tym przypadku traktowana jest jako sytuacja potencjalnie niebezpieczna, czyli taka, w wyniku której możliwe jest zderzenie się wózków a w jego efekcie wystąpienie urazów, utraty zdrowia i życia ich operatorów. Szczególna uwaga będzie zwracana na sytuacje kolizyjne wózków w korytarza poprzecznych, w których ryzyko wypadku jest największe (tam przecinają się drogi wózków poruszających się w korytarzach poprzecznych i korytarzach roboczych, które są wąskie i zlokalizowane pomiędzy dwoma rzędami regałów, co znacząco ogranicza widoczność operatorom, wózki poruszające się w korytarzach poprzecznych zazwyczaj osiągają duże prędkości).

Na potrzeby prowadzonych badań symulacyjnych założono dodatkowo, że w różnych wariantach organizacyjnych układów transportu wewnętrznego będą wykorzystywane różne liczby wózków widłowych, różne układy regałów w strefie składowania materiałów oraz różne zasady poruszania się w korytarzach roboczych i poprzecznych strefy rezerw (jednokierunkowe, dwukierunkowe). Jako stałe w poszczególnych wariantach przyjęto natomiast rozkłady prawdopodobieństwa pojawienia się w systemie zadań, które przydzielane są operatorom wózków, a także czas symulacji.

Wobec powyższego, założenia przyjęte do badań związanych z modelowaniem i oceną bezpieczeństwa pracowników w procesach magazynowych są następujące:

- ocena bezpieczeństwa wykonana zostanie na podstawie badań symulacyjnych,
- na potrzeby badań symulacyjnych opracowane zostaną modele symulacyjne różnych wariantów organizacyjnych układów transportu wewnętrznego (obiektów magazynowych),
- w opracowanych modelach symulowane będą procesy magazynowe realizowane przez wózki widłowe w strefie składowania oraz buforowej na wejściu i wyjściu z układu transportu wewnętrznego,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

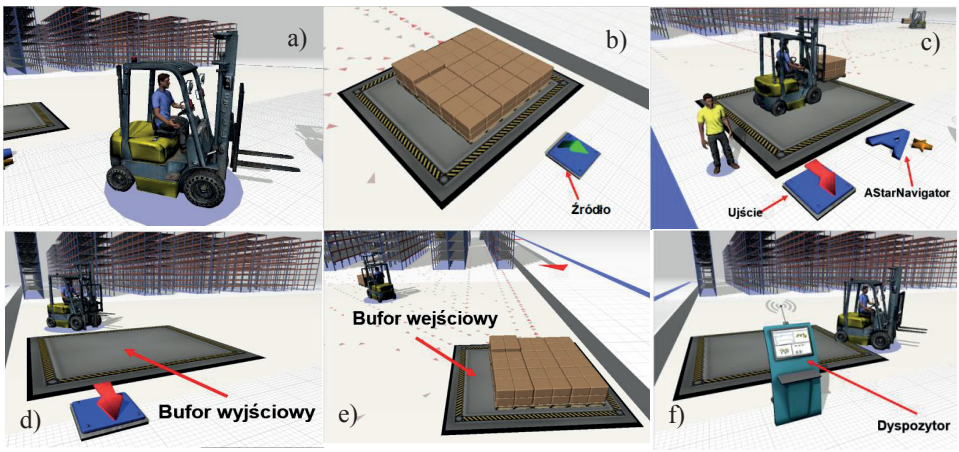
- jako miarę oceny bezpieczeństwa pracowników w procesach magazynowych przyjęto liczbę sytuacji potencjalnie niebezpiecznych (tj. sytuacji kolizyjnych wózków – sytuacji, w których dochodzi do przecięcia się trajektorii ruchu co najmniej dwóch wózków magazynowych w tej samej chwili; w ich wyniku może dojść do zderzenia się wózków oraz utraty zdrowia i życia ich operatorów),
- szczególna uwaga zwrócona zostanie na sytuacje kolizyjne w korytarzach poprzecznych,
- w poszczególnych wariantach organizacyjnych wykorzystane zostaną różne liczby wózków magazynowych przeznaczonych do realizacji zadań magazynowych (odpowiednio 4, 6 lub 8 wózków),
- w poszczególnych wariantach organizacyjnych wykorzystane zostaną różne układy strefy składowania (z dwoma i trzema blokami regałowymi),
- w poszczególnych wariantach organizacyjnych jest stała liczba rzędów regałowych, poziomów składowania i zatok magazynowych, wobec czego stała i niezmienna jest też liczba dostępnych miejsc składowania materiałów,
- w poszczególnych wariantach organizacyjnych wykorzystywane wózki magazynowe mają takie same parametry (np. prędkość jazdy, czas przyśpieszania, hamowania, prędkość podnoszenia wideł, czas pobierania, odkładania jednostek),
- badania symulacyjne dla wszystkich wariantów organizacyjnych wykonywane są dla takiego samego przedziału czasu – 8 godzin pracy układu,
- w badaniach symulacyjnych dla wszystkich wariantów organizacyjnych elementy składowe modeli mają takie same parametry (np. intensywność zgłoszeń zadań wprowadzania materiałów do strefy składowania i zadań wyprowadzenia materiałów ze strefy rezerw),
- podczas badań symulacyjnych dla wszystkich wariantów organizacyjnych estymowane będą dodatkowe parametry uwzględniające wydajność układu i całkowitą długość drogi przebytej przez środki transportu,
- wyszukiwanie ścieżek transportowych, wg których będę poruszały się wózki, odbywa się na podstawie algorytmu A*.

8.2. PARAMETRY PODSTAWOWYCH ELEMENTÓW MODELU SYMULACYJNEGO

Na potrzeby realizacji badań dotyczących oceny bezpieczeństwa pracy w układach transportu wewnętrznego opracowano szereg modeli symulacyjnych odwzorowujących poszczególne warianty organizacyjne obiektu magazynowego (opisane w rozdziale 8.1). Poszczególne modele składają się z następujących elementów:
- wózki widłowe z operatorami (rys. 8.1a),
- regał paletowy,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

- źródło materiałów wchodzących do układu transportu wewnętrznego (rys. 8.1b),
- ujście strumieni materiałów wychodzących z układu transportu wewnętrznego (rys. 8.1c),
- bufory jednostek materiałowych oczekujących na obsługę w układzie transportu wewnętrznego (rys. 8.1d-e),
- dyspozytor zadań niezbędnych do realizacji w układzie transportu wewnętrznego (rys. 8.1f),
- AStarNavigator (rys. 8.1c),
- bariery do organizacji ruchu w układzie transportu wewnętrznego (rys. 8.2a).



Rys. 8.1. Podstawowe elementy modelu symulacyjnego: wózek widłowy z operatorem (a), źródło (b) i ujście (c) materiałów wychodzących z układu oraz AStarNavigator (c), bufory materiałów na wejściu i wyjściu z układu (d, e), dyspozytor zadań niezbędnych do realizacji w układzie (f)

Źródło: model opracowany w środowisku FlexSim.

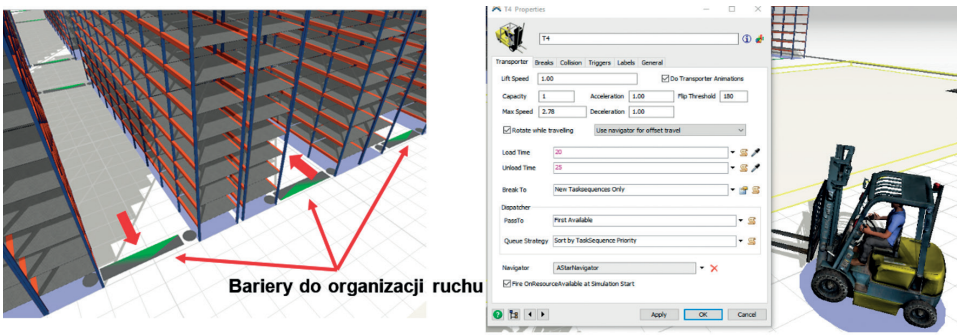
Głównym zadaniem wózków widłowych z operatorami jest realizacja zdań przydzielonym im przez dyspozytora. Zadania jakie mogą zostać przydzielone do realizacji polegają na:

- pobraniu jednostki ładunkowej materiału w buforze wejściowym,
- przewiezieniu jednostki ładunkowej materiału do miejsca odłożenia w regale,
- ulokowaniu jednostki ładunkowej materiału w regale,
- dotarciu do gniazda regałowego, z którego należy wyprowadzić jednostkę materiału,
- pobraniu jednostki ładunkowej materiału z regału,
- przewiezieniu jednostki ładunkowej materiału do bufora wyjściowego,
- odłożeniu jednostki ładunkowej materiału w buforze wyjściowym,
- oczekiwaniu na przydzielenie kolejnego zadania.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wszystkie środki transportu wewnętrznego (wózki widłowe) mają przypisane takie same wartości podstawowych parametrów ruchowych. Każdy z pojazdów ma określone następujące wartości parametrów ruchowych (rys. 8.2b):

- ładowność – 1 jł (jednostka ładunkowa),
- przyśpieszenie – 1 m/s^2,
- hamowanie – 1 m/s^2,
- prędkość maksymalna – 2,78 m/s,
- prędkość podnoszenia wideł – 1 m/s,
- czas podjęcia ładunku – 20 s,
- czas odłożenia ładunku – 25 s.



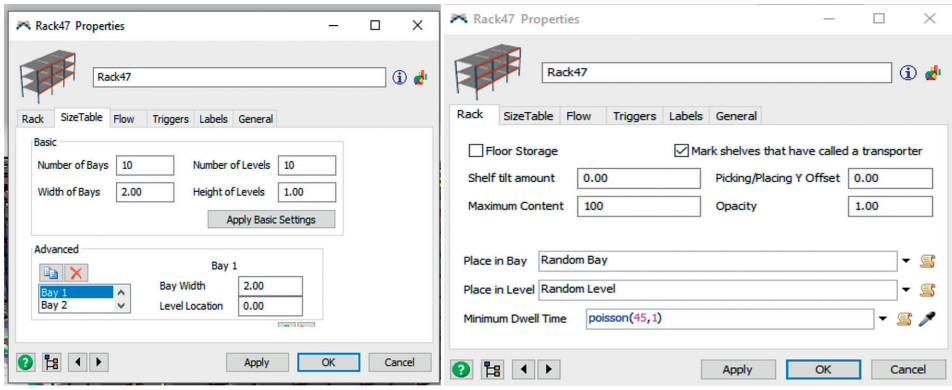
Rys. 8.2. (a) Bariery do organizacji ruchu w układzie transportu wewnętrznego oraz (b) maska parametryzacji wózka widłowego – wartości parametrów wózków widłowych

Źródło: model opracowany w środowisku FlexSim.

Regał w modelu wykorzystywany jest do odwzorowania strefy składowania. Pojedynczy regał reprezentuje pojedynczy rząd regałowy. W opracowanych modelach wykorzystano 24 rzędy regałowe. Każdy rząd składa się z 10 kolumn regałowych i posiada 10 poziomów składowania (rys. 8.3). Wobec tego w każdym rzędzie jest dostępnych 100 miejsc składowania, a w całej strefie składowania około 2400 takich miejsc. Jednostki dostarczane do regałów lokowane są w nich w sposób losowy, czyli w losowo wybranych gniazdach regałowych. Normatyw zapasu (czas jaki jednostka średnio spędza w lokacji) dla każdego regału określono na podstawie rozkładu Poissona o oczekiwanym odstępie czasu pomiędzy kolejnymi zdarzeniami równym 45 sekund (rys. 8.3).

Źródło w modelu jest elementem, który generuje strumień materiałów pojawiających się w układzie transportu wewnętrznego. Materiały pojawiają się z prawdopodobieństwem określonym według rozkładu Poissona o oczekiwanym odstępie czasu pomiędzy kolejnymi zdarzeniami równym 30 sekund (rys. 8.4a). Jednostką materiału obsługiwanego w całym układzie i generowaną przez źródło jest jednostka ładunkowa paletowa.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

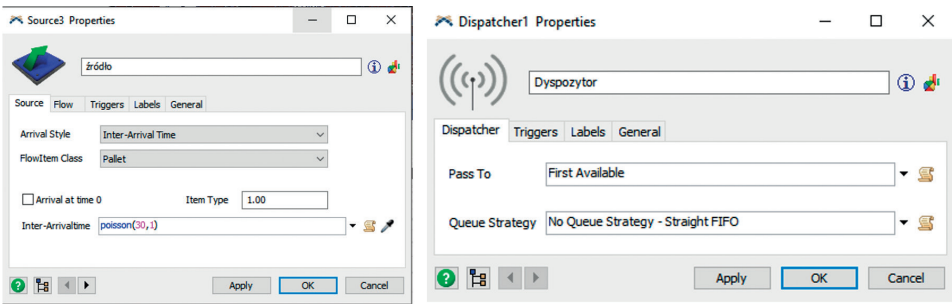


Rys. 8.3. Maski parametryzacji regału

Źródło: model opracowany w środowisku FlexSim.

Bufory w modelu służą do tymczasowego składowania materiałów oczekujących na obsługę. Bufor wejściowy zasilany jest przez źródło i z niego pobierane są jednostki przez wózki widłowe, które dalej transportują je do strefy rezerw. Bufor wyjściowy jest miejscem, do którego wózki odstawiają jednostki materiałowe, mające opuścić modelowany układ transportu wewnętrznego (strumienie materiałów opuszczające układ zanikają w ujściu).

Dyspozytor w modelu odpowiada za organizację i rozdział pracy pomiędzy wózkami magazynowymi. Wszystkie materiały dostarczane do bufora wejściowego są niezależnymi zadaniami jakie należy przydzielić operatorom wózków (np. weź jednostkę nr 0001 z bufora wejściowego i zawieź ją do lokacji nr 2548 w strefie składowania). Na potrzeby badań założono, że dyspozytor będzie przydzielał zadania pierwszemu dostępnemu urządzenia, a zadania będą przydzielane zgodnie z kolejnością ich napłynięcia do układu – strategii FIFO (rys. 8.4b).



Rys. 8.4. Maski parametryzacji źródła (a) oraz dyspozytora (b)

Źródło: model opracowany w środowisku FlexSim.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

AstarNavigator jest elementem modelu, który umożliwia wykorzystanie algorytmu A* do wyszukiwania ścieżek transportowych pomiędzy obiektami zlokalizowanymi w modelu. Po odpowiednim jego sparametryzowaniu w modelu obiekty stałe (np. regały) będą widziane przez wózki widłowe jako przeszkody i omijane podczas realizacji zadań transportowych. Dodatkowo wykorzystane mogą być różnego rodzaju bariery, które uniemożliwiają środkom transportu przejazd w danym kierunku, bądź też wskazują jednokierunkowość danego obszaru (np. możliwość wjechania do korytarza roboczego tylko z jednej strony).

8.3. LOGIKA DZIAŁANIA MODELU SYMULACYJNEGO

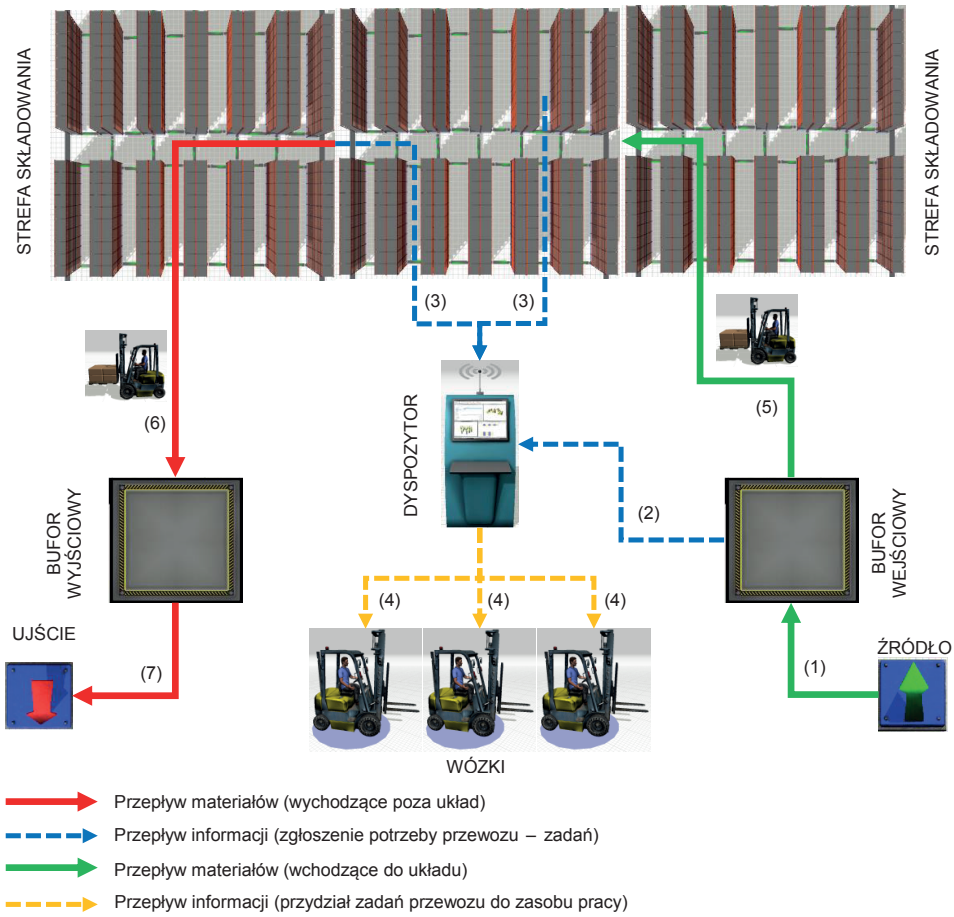
Zasadniczym zadaniem modelowanych układów transportu wewnętrznego jest zasilanie strefy rezerw w materiały pojawiające się w układzie oraz wyprowadzanie ze strefy rezerw materiałów mających opuścić układ. Wobec powyższego w modelu pojawiają się dwa rodzaje zadań – wprowadzenia i wyprowadzenia jednostek materiałowych ze strefy rezerw. Zadania te przydzielane są wolnym zasobom pracy (wózkom widłowym) zgodnie z kolejnościami ich pojawiania się w modelu.

Logikę działania modelu można przedstawić następująco (rys. 8.5):

- Materiały generowane przez źródło z intensywnością opisaną rozkładem Poissona pojawiają się w buforze wejściowym (1).
- Pojawienie się jednostki materiałowej powoduje wysłanie do dyspozytora zadania przewiezienia jej do strefy składowania (2).
- Regały znajdujące się w strefie rezerw co pewien czas (z intensywnością opisaną rozkładem Poissona) wysyłają do dyspozytora zadania odebrania od nich jednostki materiału i przewiezienia jej do bufora wyjściowego (3).
- Po otrzymaniu zadań przewozu dyspozytor poszukuje wolnego zasobu pracy, jeżeli taki odnajdzie, przydziela mu pierwsze na liście (najstarsze – najdłużej oczekujące) zadanie (4).
- W zależności od typu przydzielonego zadania wózek wprowadza jednostkę do strefy rezerw (5) bądź ją z niej wyprowadza (6) do bufora wyjściowego.
- Z bufora wyjściowego jednostki usuwane są poza układ transportu wewnętrznego (7).

Ze względu na potrzebę badania liczby sytuacji potencjalnie kolizyjnych z udziałem wózków niezbędne jest zidentyfikowanie chwil, miejsc i sytuacji, w których może do nich dojść. W tym celu w modelu symulacyjnym wykorzystane zostaną sfery (kule) zlokalizowane w obszarze konstrukcji wózków i ich przestrzeni roboczej (rys. 8.6).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

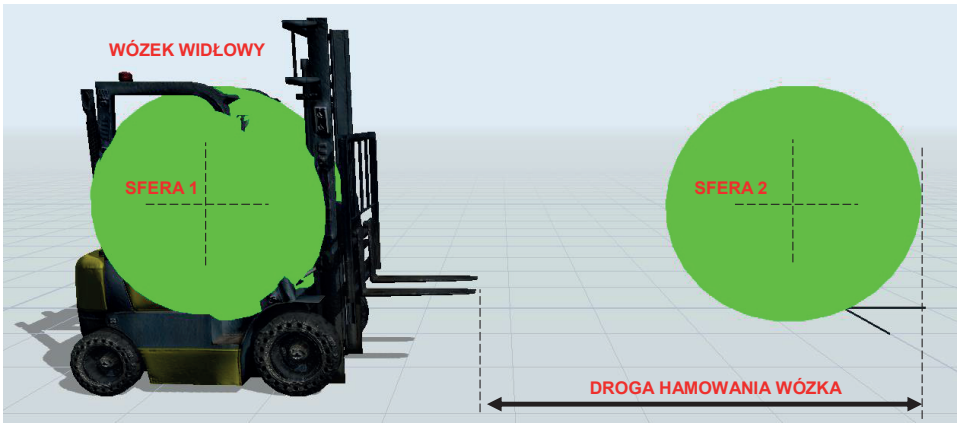


Rys. 8.5. Schemat logiki działania oraz przepływu materiałów, informacji i zadań w modelowanych układach transportu wewnętrznego

Źródło: opracowanie własne.

Do każdego wykorzystywanego w symulacji środka transportu będą przypisane dwie sfery. Pierwsza z nich będzie ulokowana w centralnej osi pionowej wózka, druga natomiast przed nim, w centralnej osi poziomej, równoległej do kierunku jazdy (rys. 8.6). Odległość drugiej sfery od czoła wózka uzależniona jest od oczekiwanej długości drogi hamowania środka transportu przy zadanej prędkości maksymalnej. Na potrzeby badań założono, że jeżeli podczas symulacji sfery różnych obiektów (wózków) przetną się (nałożą na siebie), wówczas model będzie identyfikował tę sytuację jako sytuację potencjalnie niebezpieczną.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 8.6. Ułożenie sfer wózka widłowego wykorzystywanych do wykrywania kolizji w modelu symulacyjnym

Źródło: opracowanie własne – model symulacyjny FlexSim.

8.4. WARIANTY SYMULACYJNE

8.4.1. UKŁAD KORYTARZY ROBOCZYCH I ORGANIZACJA PRACY

Na potrzeby prowadzonych badań bezpieczeństwa pracowników w obiektach magazynowych skonstruowano 21 różnych wariantów projektowych odwzorowujących układ przestrzenny, funkcjonalny i organizację pracy w tychże obiektach. Warianty wyróżniały się (tabela 8.1):

- układem strefy składowania (liczba wykorzystanych bloków regałowych – układ dwublokowy i trójblokowy),
- liczbą wykorzystanych środków transportu wewnętrznego do realizacji zadań (wykorzystywanie 4, 6 oraz 8 wózków),
- organizacją ruchu na drogach transportowych – w korytarzach (ruch dwukierunkowy we wszystkich korytarzach, ruch jednokierunkowy w korytarzach roboczych i dwukierunkowych w korytarzach poprzecznych, ruch jednokierunkowy w korytarzach roboczych i poprzecznych),
- obszarem analizy sytuacji kolizyjnych (w korytarzach roboczych i poprzecznych, tylko w korytarzach poprzecznych).

W celu umożliwienia miarodajnego porównania uzyskanych wyników, zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdziale 8.1 we wszystkich wariantach obiektu logistycznego niezmienna pozostaje pojemność strefy składowania.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 8.1. Tabela analizowanych wariantów organizacyjnych układu transportu wewnętrznego

Lp.	Nazwa wariantu	Układ strefy	Organizacja ruchu	Liczba wózków	Obszar analizy kolizji
1	3B_2W_4U_ZK	3 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	4	we wszystkich korytarzach
2	3B_2W_6U_ZK	3 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	6	we wszystkich korytarzach
3	3B_2W_8U_ZK	3 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	8	we wszystkich korytarzach
4	3B_2W_4U_BK	3 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	4	w korytarzach poprzecznych
5	3B_2W_6U_BK	3 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	6	w korytarzach poprzecznych
6	3B_2W_8U_BK	3 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	8	w korytarzach poprzecznych
7	3B_1W_4U_BK	3 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, dwukierunkowe korytarze poprzeczne	4	w korytarzach poprzecznych
8	3B_1W_6U_BK	3 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, dwukierunkowe korytarze poprzeczne	6	w korytarzach poprzecznych
9	3B_1W_8U_BK	3 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, dwukierunkowe korytarze poprzeczne	8	w korytarzach poprzecznych
10	3B_P_4U_BK	3 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, jednokierunkowe korytarze poprzeczne	4	w korytarzach poprzecznych
11	3B_P_6U_BK	3 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, jednokierunkowe korytarze poprzeczne	6	w korytarzach poprzecznych
12	3B_P_8U_BK	3 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, jednokierunkowe korytarze poprzeczne	8	w korytarzach poprzecznych
13	2B_2W_4U_BK	2 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	4	w korytarzach poprzecznych
14	2B_2W_6U_BK	2 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	6	w korytarzach poprzecznych
15	2B_2W_8U_BK	2 bloki regałowe	korytarze dwukierunkowe	8	w korytarzach poprzecznych
16	2B_1W_4U_BK	2 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, dwukierunkowe korytarze poprzeczne	4	w korytarzach poprzecznych

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

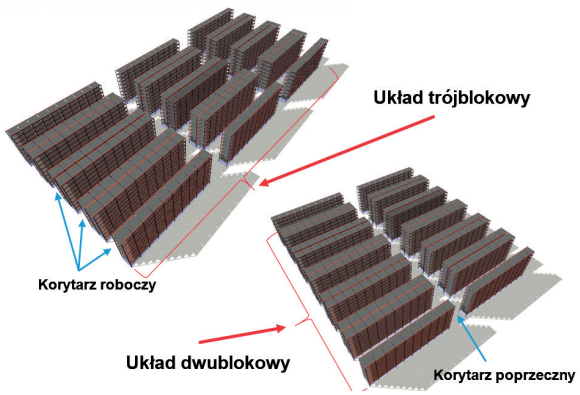
Tabela 8.1. cd.

Lp.	Nazwa wariantu	Układ strefy	Organizacja ruchu	Liczba wózków	Obszar analizy kolizji
17	2B_1W_6U_BK	2 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, dwukierunkowe korytarze poprzeczne	6	w korytarzach poprzecznych
18	2B_1W_8U_BK	2 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, dwukierunkowe korytarze poprzeczne	8	w korytarzach poprzecznych
19	2B_P_4W_BK	2 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, jednokierunkowe korytarze poprzeczne	4	w korytarzach poprzecznych
20	2B_P_6U_BK	2 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, jednokierunkowe korytarze poprzeczne	6	w korytarzach poprzecznych
21	2B_P_8U_BK	2 bloki regałowe	jednokierunkowe korytarze robocze, jednokierunkowe korytarze poprzeczne	8	w korytarzach poprzecznych

Źródło: opracowanie własne.

Oznacza to, że nie zmienia się liczba rzędów regałowych, liczba korytarzy roboczych, liczba pionów regałowych w każdym rzędzie oraz liczba poziomów składowania. W poszczególnych wariantach zmianie ulega liczba bloków regałowych (rys. 8.7).

Zmiana liczby bloków regałowych pociąga za sobą zmianę korytarzy poprzecznych, w których wózki zmieniają korytarze robocze. W układach z trzema blokami występują 4 korytarze poprzeczne, a w każdym bloku są 4 korytarze robocze.



Rys. 8.7. Analizowane układy strefy składowania

Źródło: opracowanie własne – model symulacyjny FlexSim.

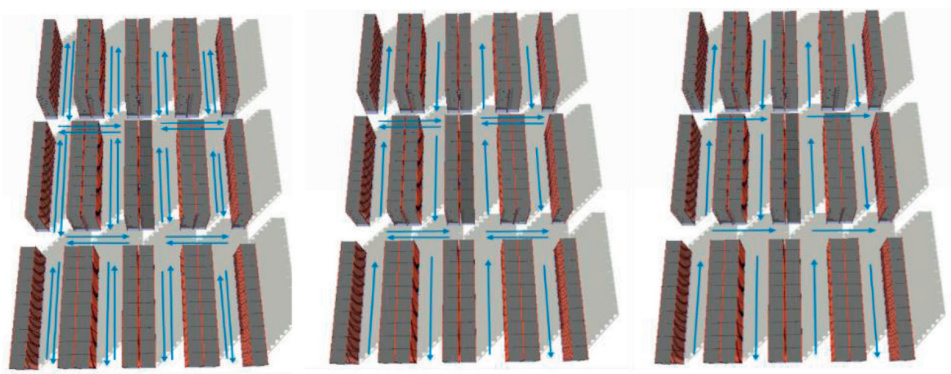
Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

W przypadku układów składających się z dwóch bloków, w każdym z nich występuje 6 korytarzy roboczych oraz 3 korytarze poprzeczne (rys. 8.7).

Kolejne zmiany w poszczególnych wariantach dotyczą organizacji ruchu na drogach transportowych (w korytarzach). W pierwszym przypadku założono ruch dwukierunkowy we wszystkich korytarzach (zarówno korytarzach roboczych jak i korytarzach poprzecznych) – patrz rys. 8.8. Na potrzeby dalszych badań nad bezpieczeństwem w układach transportu wewnętrznego założono, że w korytarzach roboczych możliwy będzie tylko ruch jednokierunkowy (korytarze poprzeczne pozostają dwukierunkowe) – patrz rys. 8.8. W takim przypadku przylegające do siebie w kolejnych blokach korytarze robocze umożliwiają ruch w tym samym kierunku, natomiast korytarze przylegające do siebie w ramach pojedynczego bloku mają zadane przeciwne kierunki ruchu (rys. 8.8).

Ostatnia analizowana zmiana w ramach organizacji ruchu polega na wprowadzeniu ruchu jednokierunkowego w korytarzach poprzecznych. We wszystkich korytarzach poprzecznych pracownicy mogą poruszać się w jednym i tym samym kierunku (w prawo) – patrz rys. 8.8. Taka organizacja ruchu wprowadza sposób poruszania się pracowników zbliżony do metody heurystycznej S-shape.

Na potrzeby prowadzonych badań zmianie podlegała również liczba wykorzystywanych środków transportu wewnętrznego. W różnych układach transportu wewnętrznego wykorzystywane były 4, 6 albo 8 wózków widłowych wraz z operatorami. Zmiana liczby wózków ma za zadanie pokazanie zależności pomiędzy liczbą wykorzystywanych urządzeń, liczbą potencjalnie niebezpiecznych sytuacji oraz wydajnością analizowanego układu.



Rys. 8.8. Organizacja ruchu w strefie składowania – dwukierunkowy ruch we wszystkich korytarzach roboczych (a) oraz jednokierunkowe korytarze robocze (b), jednokierunkowy ruch w korytarzach roboczych oraz jednokierunkowy ruch w korytarzach poprzecznych (c)

Źródło: opracowanie własne – model symulacyjny FlexSim.

Podczas symulacji procesu magazynowego w modelowanych wariantach obiektu magazynowego identyfikowane i analizowane będą sytuacje kolizyjne

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

poszczególnych środków transportu wewnętrznego. Sytuacje te mogą się pojawić podczas pracy urządzeń zarówno w korytarzach roboczych, jak i poprzecznych. Dlatego również będą one przedmiotem zainteresowań autorów w przedstawionych badaniach.

Na potrzeby badań dla każdego z wariantów przeprowadzono 55 niezależnych symulacji (55 replikacji – Rep. – dla każdego analizowanego wariantu). Każda z symulacji odwzorowywała 8-godzinny czas pracy obiektu magazynowego. Wejścia i wyjścia materiałów z układu opisano za pomocą rozkładu prawdopodobieństwa (rozkład Poissona). W wyniku uzyskano wartości liczbowe dotyczące liczby kolizji występujących pomiędzy wózkami poruszającymi się w układzie, całkowitą długość drogi pokonaną przez wszystkie wózki w ciągu 8 godzin (w kilometrach) oraz wydajność układu, wyrażoną liczbą jednostek materiałowych obsłużonych w jednostce czasu (w ciągu godziny). Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawiono w rozdziale 8.5 w postaci tabelarycznej oraz graficznej.

8.4.2. PRĘDKOŚĆ PORUSZANIA SIĘ W UKŁADZIE TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

W prowadzonych badaniach symulacyjnych analizie poddano również wpływ prędkości poruszania się wózków widłowych na bezpieczeństwo pracy w obiekcie magazynowym.

W tym celu, podobnie jak w przypadku poprzednich założeń, niezbędna jest znajomość liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w pracy obiektu logistycznego. Jak zostało wspomniane, możliwe jest jej określenie z wykorzystaniem narzędzi modelowania symulacyjnego. Dlatego także przygotowano model symulacyjny odwzorowujący pracę wózków widłowych w obiekcie magazynowym. Założono w nim, że do podstawowych zadań operatorów wózków należy wprowadzenie jednostek magazynowych do strefy rezerw (podjęcie jednostek ładunkowych w wydzielonej strefie buforowej, przewóz do strefy regałowej, odłożenie do regału) oraz wyprowadzenie jednostek ładunkowych do strefy buforowej na wyjściu z układu transportu wewnętrznego (podjęcie jednostek ładunkowych z wybranego regału, przewóz do wydzielonej strefy buforowej na wyjściu z układu, odłożenie do buforowania na wyjściu). Wykorzystane w poszczególnych wariantach wózki mają takie same parametry i charakterystyki (np. prędkość jazdy, czas przyspieszania, hamowania, prędkość podnoszenia wideł, pobierania, odkładania jednostek). Do wyszukiwania ścieżek transportowych, wg których będę poruszały się wózki wykorzystano algorytm A*.

Na potrzeby badań przeanalizowano 12 różnych scenariuszy. W zależności od przyjętego scenariusza procesy magazynowe realizowały 4 lub 8 wózków,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

a każdy z nich poruszał się z tą samą prędkością różną dla poszczególnych scenariuszy (patrz tabela 8.2). Z założoną prędkością związana jest bezpośrednio długość drogi hamowania (patrz tabela 4.2 oraz tabela 4.3).

Tabela 8.2. Scenariusze badań wpływu prędkości na bezpieczeństwo

Nr scenariusza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Liczba wózków	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8
Prędkość maksymalna [m/s]	1,11	1,39	1,67	2,22	2,78	3,33	1,11	1,39	1,67	2,22	2,78	3,33
Droga hamowania [m]	1,6	2	2,5	3,4	4,3	5,3	1,6	2	2,5	3,4	4,3	5,3

Źródło: opracowanie własne.

Do badań wykorzystano model strefy regałowej charakteryzującej się takim samym układem funkcjonalnym jak w przypadku pozostałych wariantów (patrz rozdział 8.2). Jednostki dostarczane do regałów lokowane były w sposób losowy, czyli w losowo wybranych dostępnych gniazdach regałowych. Zadania (generowane przez każdy z regałów) wyprowadzenia ze strefy rezerw jednostki materiałowej określono na podstawie rozkładu Poissona o oczekiwanym odstępie czasu pomiędzy kolejnymi zgłoszeniami równym 4,5 minuty.

Strefa rezerw w modelu została odwzorowana w postaci układu trójblokowego. W każdym bloku znajdują się 4 korytarze robocze i 8 rzędów regałowych (rys. 8.7). W strefie występują 4 korytarza poprzeczne, a ruch jest zorganizowany dwukierunkowo w każdym z korytarzy strefy (rys. 8.8a).

8.5. WYNIKI PROWADZONYCH BADAŃ

8.5.1. UKŁAD TRÓJBLOKOWY Z ANALIZĄ SYTUACJI KOLIZYJNYCH WE WSZYSTKICH KORYTARZACH

W pierwszym etapie badań przeprowadzono symulacje z wykorzystaniem modelu odwzorowującego trójblokowy układ strefy kompletacji. Po strefie poruszało się odpowiednio 4, 6 oraz 8 operatorów wózków widłowych. Wszystkie drogi transportu wewnętrznego były drogami dwukierunkowymi. Uzyskane wyniki dla wariantów (3B_2W_4U_ZK, 3B_2W_6U_ZK oraz 3B_2W_8U_ZK) przedstawiono tabelarycznie w tabeli 8.3.

Zestawienie liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych przy wykorzystaniu 4, 6 oraz 8 wózków przedstawiono na wykresie (rys. 8.9).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 8.3. Wyniki dla wariantów: 3B_2W_4U_ZK, 3B_2W_6U_ZK oraz 3B_2W_8U_ZK

Numer replikacji	Wartość parametru								
	Liczba sytuacji kolizyjnych [szt.]			Długość drogi [km]			Wydajność [jl/h]		
	Liczba wózków			Liczba wózków			Liczba wózków		
	4	6	8	4	6	8	4	6	8
Rep 1	264	668	1141	154,46	223,93	220,49	165,25	242,75	241,5
Rep 2	262	671	1119	151,81	222,94	220,1	168	241,75	242,38
Rep 3	253	720	1123	152,99	222,85	220,14	166,88	242	242,38
Rep 4	258	697	1105	152,42	221,79	219,92	167,5	239,38	241
Rep 5	268	674	1103	153,05	222,33	222,67	166,5	243,13	244
Rep 6	228	658	1054	154,55	220,06	221,18	165,25	240	242
Rep 7	245	698	1159	152,32	222,56	220,77	167,5	243,25	244
Rep 8	254	729	1105	153,78	225,5	219,61	165,75	240,88	242,5
Rep 9	266	727	1166	153,2	225,45	222,5	166,5	241,5	243,25
Rep 10	234	659	973	153,07	219,27	220,53	166,63	239	242,63
Rep 11	200	655	1112	152,79	217,91	215,28	167,25	239,25	239,75
Rep 12	250	740	1171	151,23	222,48	215,46	168,63	242,13	239,75
Rep 13	271	661	1028	153,75	218,54	220,64	166,13	240	241,25
Rep 14	247	700	1124	152,27	222,33	219,65	167,5	241,25	241,5
Rep 15	263	695	1050	152,75	222,29	218,35	167,25	241,13	241,38
Rep 16	246	693	1087	152,14	221,91	222,12	167,88	243,38	245,5
Rep 17	267	709	1149	152,02	221,22	218,36	167,75	241,63	243,63
Rep 18	257	706	1103	154,79	228,08	225,28	165,13	241,5	244
Rep 19	258	662	1164	152,04	219,72	220	167,88	238,88	241,13
Rep 20	234	655	1101	152,28	222,93	220,72	167,5	241,63	243,5
Rep 21	274	655	1170	150,58	222,18	223,47	169,13	242	244,63
Rep 22	236	649	1144	151,71	220,36	216,51	167,88	239,5	239,88
Rep 23	264	653	1081	154,28	218,51	215,8	165,38	241,75	240,63
Rep 24	267	716	1074	153,68	224,78	216,82	166	240,75	240,25
Rep 25	247	660	1163	153,2	222,17	218,55	166,75	241,5	239,63
Rep 26	238	730	1155	151,35	221,12	215,05	168,63	241,38	240,25
Rep 27	274	728	1164	150,29	221,38	218,86	169,63	241	241,38
Rep 28	225	659	1082	152,44	219,86	218,57	167,25	239,75	241,25
Rep 29	252	674	1120	153,95	222,97	218,93	165,88	241,25	240,63
Rep 30	242	682	1120	151,9	220,39	215,5	167,88	239,25	239,63
Rep 31	246	728	1137	151,7	223,71	218,76	168	241,63	241

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 8.3. cd.

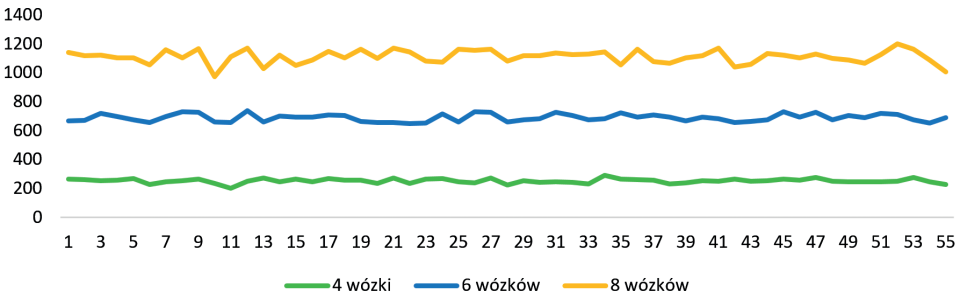
Numer replikacji	Wartość parametru								
	Liczba sytuacji kolizyjnych [szt.]			Długość drogi [km]			Wydajność [jl/h]		
	Liczba wózków			Liczba wózków			Liczba wózków		
	4	6	8	4	6	8	4	6	8
Rep 32	243	706	1126	153,17	218,31	218,77	166,63	240	240,75
Rep 33	230	674	1130	152,82	223,45	219,39	167	243	243,13
Rep 34	289	682	1143	153,43	221,27	214,93	166,13	240,5	240,38
Rep 35	265	724	1054	151,43	219,87	219,84	168,38	242,13	245,88
Rep 36	261	695	1164	152,22	216,55	217,58	167,38	239,38	241,5
Rep 37	258	707	1079	152,12	222,36	220,29	167,75	241,88	241,63
Rep 38	233	695	1068	152,66	219,79	219,04	167,13	240,38	240,25
Rep 39	238	669	1102	151,84	219,43	214,82	168	240,63	241,88
Rep 40	254	693	1119	154,43	225,42	224,25	165,38	243,13	244,63
Rep 41	250	682	1169	153,6	224,18	223,51	166,13	241,5	242,5
Rep 42	263	656	1042	151,8	223,74	219,41	167,88	241,5	240,63
Rep 43	250	663	1060	154,22	223,41	220,38	165,75	241,88	241,88
Rep 44	254	673	1133	151,52	217,56	221,95	168,25	241,25	241,63
Rep 45	263	732	1123	153,3	227,07	224,68	166,5	242,75	241,75
Rep 46	257	695	1103	151,74	219,83	217,41	168	239,13	238,63
Rep 47	277	727	1129	153,34	221,74	219,51	166,5	240,88	240,25
Rep 48	249	674	1100	151,47	219,45	218,64	168,25	239,63	240,13
Rep 49	246	706	1087	153,89	220,75	219,03	165,88	242,5	241
Rep 50	247	688	1065	153,35	225,42	221,94	166,38	240,75	240
Rep 51	247	719	1127	152,64	223,44	218,44	167,25	241,5	238,5
Rep 52	251	712	1201	153,04	225,48	227,84	166,75	243,25	245,13
Rep 53	275	673	1162	152,4	220,77	218,72	167,38	241,25	241,75
Rep 54	245	651	1088	152,83	222,7	217,11	166,88	242,25	241,38
Rep 55	229	691	1006	152,86	225,88	216,38	167,13	242,25	240

Źródło: opracowanie własne.

Graficzne prezentacje rozrzutu liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych (dla 4, 6 oraz 8 wózków) oraz wizualizacja miejsc, w których zachodziły te sytuacje (rys. 8.10) bezpośrednio wskazują, że wraz ze wzrostem liczby wykorzystywanych środków transportu wewnętrznego spada poziom bezpieczeństwa w układzie transportu wewnętrznego (ze względu na znaczący wzrost sytuacji potencjalnie niebezpiecznych).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Wzrost liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych wraz ze wzrostem liczby wykorzystywanych środków transportu można uznać za trend przewidywalny. Jednak bardzo często w obiektach czy też układach transportu wewnętrznego zwiększa się liczbę środków transportu w celu doprowadzenia do wzrostu jego wydajności i skrócenia czasów realizacji określonych czynności i zadań. Na potrzeby sprawdzenia jak omówiona zmiana liczby wózków wpłynęła na inne parametry układu w tabeli 8.4 przedstawione zostały wartości średnie całkowitej długości drogi pokonanej przez wszystkie wykorzystywane środki transportu w ciągu 8 godzin pracy układu (wyznaczone na podstawie wyników wszystkich 55 symulacji – replikacji) oraz średnia wydajność układu wyrażona w liczbie jednostek ładunkowych obsłużonych (wprowadzonych i wyprowadzonych z układu) w jednostce czasu (godzinie bądź minucie).



Rys. 8.9. Zestawienie liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych przy wykorzystaniu 4, 6 oraz 8 wózków

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.4. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_2W_4U_ZK, 3B_2W_6U_ZK oraz 3B_2W_8U_ZK

Nazwa wariantu	Nazwa parametru			
	Liczba sytuacji kolizyjnych [szt.]	Długość drogi [km]	Wydajność [jł/h]	Wydajność [jł/min]
2W_4U_ZK	252,07	152,71	167,09	2,78
2W_6U_ZK	689,05	221,99	241,23	4,02
2W_8U_ZK	1111,40	219,54	241,66	4,03

Źródło: opracowanie własne.

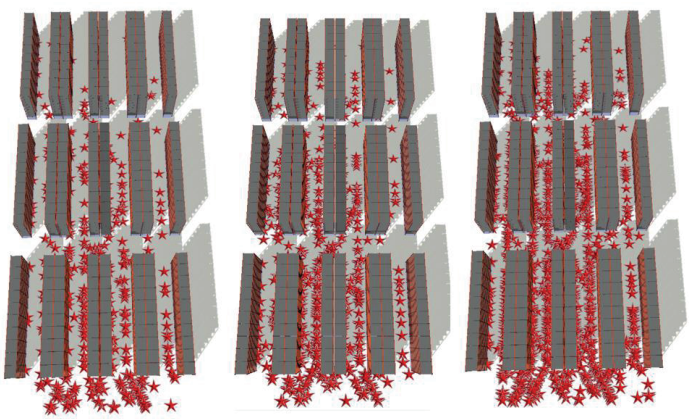
Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 8.4 zauważalne jest, iż wzrost wydajności układu nie jest proporcjonalny wraz ze wzrostem liczby wykorzystanych urządzeń. Przy zwiększeniu liczby wózków z 4 do 6 liczba

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

zarejestrowanych sytuacji potencjalnie niebezpiecznych wzrosła niemal trzykrotnie (274%). Wydajność układu wzrosła jednocześnie o niespełna połowę (44%). W przypadku zmiany liczby wykorzystywanych wózków z 6 do 8 liczba sytuacji niebezpiecznych wzrosła o 80% przy równoczesnym braku wzrostu wydajności (wzrost o ok. 0,17%). Oznacza to, że wzrost liczby środków transportu wewnętrznego powoduje znaczący spadek poziomu bezpieczeństwa w układzie transportu wewnętrznego przy niewielkim wzroście jego wydajności.

Podczas każdej z symulacji w momencie pojawienia się sytuacji niebezpiecznej sczytywane były zarówno chwile ich zajścia, jak również miejsca i urządzenia, które brały w nich udział. Miejsca pojawiania się sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w strefie składowania dla jednej z przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rys. 8.10.

Wizualizacja miejsc pojawiania się sytuacji potencjalnie niebezpiecznych wskazuje, iż najczęściej dochodziło do nich w obrębie korytarzy roboczych (blisko 80% zdarzeń). Należy jednak zauważyć, iż bardzo często w korytarzach roboczych wózki pracują z ograniczoną prędkością. Dodatkowo szerokość korytarzy pozwala na swobodne wyminięcie się środków transportu (jeżeli przyjęto, że istnieje możliwość pracy dwóch wózków w jednym korytarzu), a widoczność jest odpowiednio dobra (jadąc w korytarzu łatwo zauważyć znajdujący się przed sobą inny wózek). W celu ograniczenia takich sytuacji możliwe jest również wprowadzenie organizacji ruchu w tych korytarzach, np. ruch jednokierunkowy, sygnalizacja świetlna, ograniczenie liczby wózków mogących równocześnie pracować w tym samym korytarzu (co będzie analizowane i symulowane w kolejnych badaniach niniejszego grantu).



Rys. 8.10. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach

Źródło: opracowanie własne – model symulacyjny FlexSim.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Ze względu na powyższe ustalenia oraz bardzo dużą liczbę sytuacji potencjalnie niebezpiecznych jakie były identyfikowane podczas prowadzonych badań, założono, że w podczas symulacji kolejnych wariantów analizowane będą jedynie sytuacje kolizyjne zachodzące w korytarzach poprzecznych (w nich prawdopodobieństwo wypadku jest znacząco większe, a tym samym mają większy wpływ na poziom bezpieczeństwa w analizowanych układach).

8.5.2. UKŁAD TRÓJBLOKOWY Z ANALIZĄ SYTUACJI KOLIZYJNYCH W KORYTARZACH POPRZECZNYCH

Zgodnie z założeniami przedstawionymi w poprzednim rozdziale, w dalszych rozważaniach analizowane będą jedynie sytuacje kolizyjne, do których dochodziło w obrębie korytarzy poprzecznych. Dodatkowo na potrzeby badań w trójblokowym układzie strefy rezerw wprowadzono trzy różne sposoby organizacji ruchu w tej strefie, tj.:
- ruch dwukierunkowy we wszystkich korytarzach (2W),
- ruch jednokierunkowy w korytarzach roboczych (1W),
- ruch jednokierunkowy w korytarzach roboczych i poprzecznych (P).

Ruch dwukierunkowy we wszystkich korytarzach (2W)

Zestawienie wyników dla wariantów z układem trójblokowym, z dwukierunkową organizacją ruchu w korytarzach roboczych i różną liczbą wykorzystanych wózków widłowych przedstawiono w tabeli 8.5. Zaprezentowane wielkości parametrów są wartościami średnimi wyznaczonymi na podstawie wszystkich 55 replikacji.

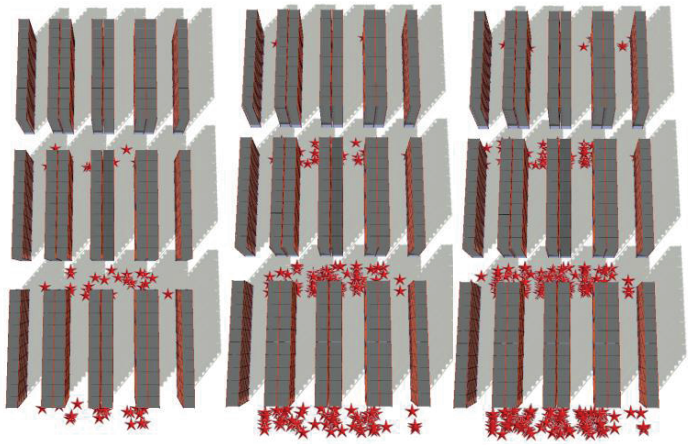
Tabela 8.5. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_2W_4U_BK, 3B_2W_6U_BK oraz 3B_2W_8U_BK

Nazwa wariantu	Nazwa parametru		
	Liczba sytuacji kolizyjnych [szt.]	Długość drogi [km]	Wydajność [jł/h]
2W_4U_BK	57	152,7	167,1
2W_6U_BK	154	222,0	241,2
2W_8U_BK	204	219,5	241,6

Źródło: opracowanie własne.

W tym przypadku również widoczny jest trend wzrostu liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych wraz ze wzrostem liczby środków transportu. Przy wykorzystanych 8 wózkach liczba sytuacji kolizyjnych znacząco rośnie. Jednocześnie niezauważalny jest wzrost wydajności całego układu. Na rys. 8.11 przedstawiono miejsca zarejestrowanych sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w poszczególnych wariantach.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 8.11. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach: 3B_2W_4U_BK, 3B_2W_6U_BK oraz 3B_2W_8U_BK

Źródło: opracowanie własne – model symulacyjny FlexSim.

Ruch jednokierunkowy w korytarzach roboczych (1W)

W kolejnym etapie badań w układach transportu wewnętrznego wprowadzono zmianę organizacji ruchu w strefie rezerw. We wszystkich korytarzach roboczych wprowadzono ruch jednokierunkowy. Co drugi korytarz umożliwiał ruch pojazdów w tym samym kierunku (np. 1, 3 i 5 korytarz pozwala na jazdę w głąb strefy, natomiast korytarz 2, 4 i 6 umożliwia powrót do czoła strefy – stref buforowych na wejściu i wyjściu z układu). Podobnie jak wcześniej przeanalizowano warianty z wykorzystaniem 4, 6 i 8 wózków widłowych.

Zestawienie wyników dla wariantów z układem trójblokowym, z jednokierunkową organizacją ruchu w korytarzach roboczych i różną liczbą wykorzystanych wózków widłowych przedstawiono w tabeli 8.6. Zaprezentowane wielkości parametrów są wartościami średnimi wyznaczonymi na podstawie wszystkich 55 replikacji.

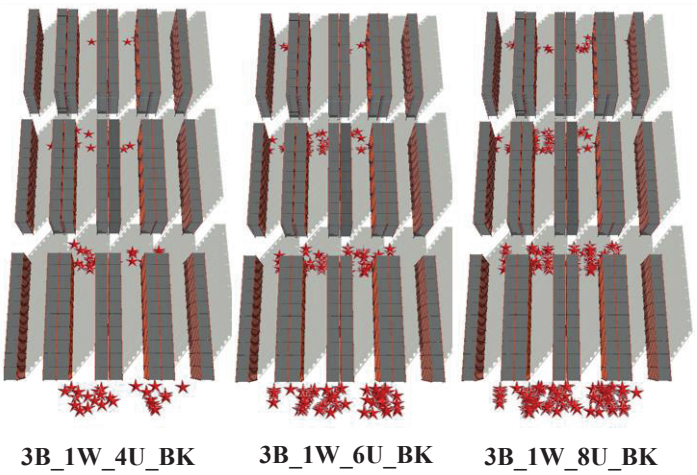
Tabela 8.6. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_1W_4U_BK, 3B_1W_4U_BK oraz 3B_1W_4U_BK

Nazwa wariantu	Nazwa parametru		
	Liczba sytuacji kolizyjnych [szt.]	Długość drogi [km]	Wydajność [jl/h]
1W_4U_BK	68	164,6	155,2
1W_6U_BK	191	247,4	232,3
1W_8U_BK	255	253,4	241,2

Źródło: opracowanie własne.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Podobnie do wcześniejszych wyników, w przypadku ruchu jednokierunkowego w korytarzach roboczych widoczny jest trend wzrostu liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych wraz ze wzrostem liczby wykorzystywanych środków transportu. Wykorzystanie 8 wózków znacząco zwiększa liczbę sytuacji kolizyjnych niedoprowadzając przy tym do znaczącego wzrostu wydajności układu. Graficzna prezentacja miejsc zajścia sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w wariantach 3B_1W_4U_BK, 3B_1W_4U_BK oraz 3B_1W_4U_BK przedstawiono na rys. 8.12.



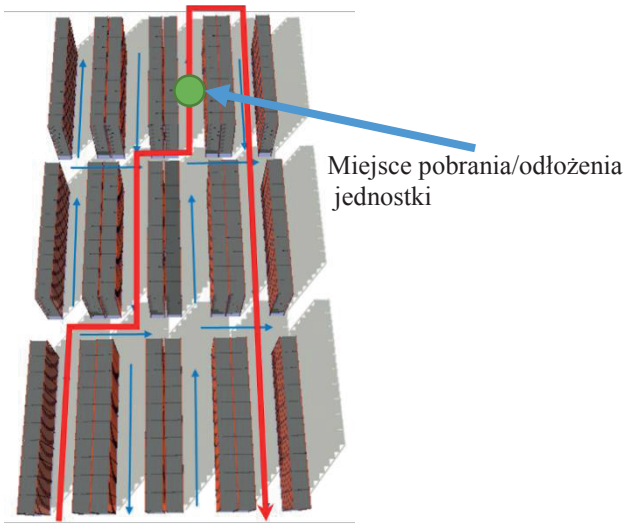
Rys. 8.12. Graficzna prezentacja miejsc zajścia identyfikacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach: 3B_1W_4U_BK, 3B_1W_6U_BK oraz 3B_1W_8U_BK

Źródło: opracowanie własne – model symulacyjny FlexSim.

Ruch jednokierunkowy w korytarzach roboczych i korytarzach poprzecznych (P)

W badaniach po raz kolejny zaimplementowano zmianę organizacji ruchu w strefie rezerw. W tym przypadku wprowadzono ruch jednokierunkowy we wszystkich korytarzach roboczych i poprzecznych. Podobnie jak w przypadku poprzedniej organizacji, co drugi korytarz umożliwia ruch pojazdów w tym samym kierunku (np. 1, 3 i 5 korytarz umożliwia jazdę w głąb strefy, natomiast korytarz 2, 4 i 6 pozwala na powrót do czoła strefy). Dodatkowo w każdym korytarzu poprzecznym możliwa jest jazda tylko w prawo (patrz rys. 8.13). Podobnie jak w poprzednich badaniach przeanalizowano warianty z wykorzystaniem 4, 6 i 8 wózków widłowych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 8.13. Organizacja ruchu w strefie składowania – jednokierunkowy ruch w korytarzach roboczych oraz jednokierunkowy ruch w korytarzach poprzecznych z zaznaczoną przykładową trasą wózka (P)

Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w tabeli 8.7. Zaprezentowane wielkości parametrów są wartościami średnimi wyznaczonymi na podstawie wszystkich 55 replikacji.

Tabela 8.7. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_P_4U_BK, 3B_P_6U_BK oraz 3B_P_8U_BK

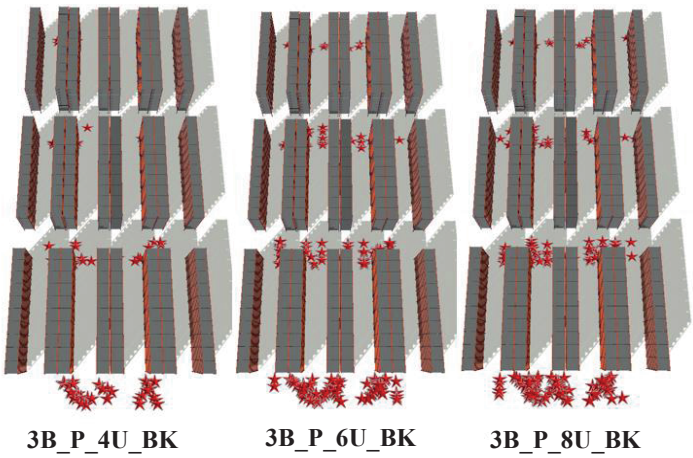
Nazwa wariantu	Nazwa parametru		
	Liczba sytuacji kolizyjnych [szt.]	Długość drogi [km]	Wydajność [jl/h]
P_4U_BK	73	168,7	151,1
P_6U_BK	208	253,1	226,6
P_8U_BK	283	265,7	241,3

Źródło: opracowanie własne.

W tym przypadku zależności pomiędzy analizowanymi parametrami nie zmieniły się w stosunku do poprzednich wariantów organizacji ruchu. Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych nadal rośnie wraz ze wzrostem liczby wykorzystywanych środków transportu, a zaangażowanie 8 urządzeń prowadzi

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

do gwałtownego wzrostu liczby tych sytuacji (dając niewspółmierne zyski we wzroście wydajności). Graficzną prezentację miejsc zajścia sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w wariantach 3B_P_4U_BK, 3B_P_4U_BK oraz 3B_P_4U_BK przedstawiono na rys. 8.14.



Rys. 8.14. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach: 3B_P_4U_BK, 3B_P_6U_BK oraz 3B_P_8U_BK

Źródło: opracowanie własne – model symulacyjny FlexSim.

8.5.3. UKŁAD DWUBLOKOWY Z ANALIZĄ SYTUACJI KOLIZYJNYCH W KORYTARZACH POPRZECZNYCH

Kolejny etap badań związanych z analizą bezpieczeństwa w układach transportu wewnętrznego na podstawie liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych (sytuacji kolizyjnych) przeprowadzono z wykorzystaniem modelu charakteryzującego się dwublokowym układem strefy rezerw. Pozostałe założenia nie uległy zmianom, czyli analizowano warianty z różną organizacją ruchu w strefie rezerw, różną liczbą środków transportu wewnętrznego (4, 6 oraz 8 wózków) oraz uwzględniano sytuacje niebezpieczne tylko w korytarzach poprzecznych.

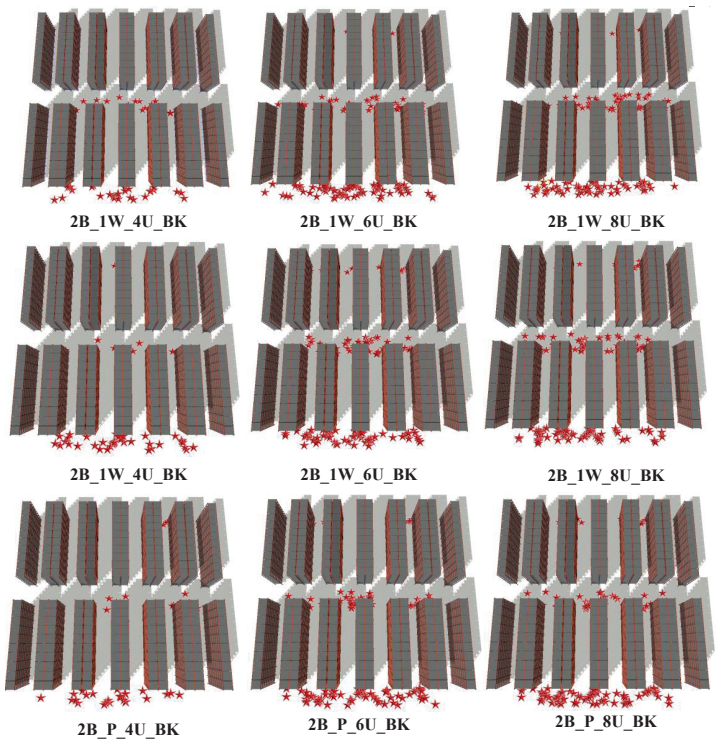
Zestawienie wyników dla poszczególnych organizacji ruchu w strefie rezerw przedstawiono w tabeli 8.8, natomiast na rys. 8.15 zaprezentowano miejsca pojawiania się sytuacji kolizyjnych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Tabela 8.8. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 reprodukcji dla wszystkich wariantów z dwublokowym układem strefy

Nazwa wariantu	Nazwa parametru		
	Liczba sytuacji kolizyjnych [szt.]	Długość drogi [km]	Wydajność [jł/h]
2W_4U_BK	48	146,2	173,6
2W_6U_BK	125	203,9	241,7
2W_8U_BK	48	146,2	173,6
1W_4U_BK	57	158,7	161,1
1W_6U_BK	162	237,1	240,2
1W_8U_BK	209	235,1	241,3
P_4U_BK	64	162,8	157,0
P_6U_BK	180	244,0	235,7
P_8U_BK	236	246,7	241,2

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.15. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach

Źródło: opracowanie własne.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

8.5.4. PRĘDKOŚĆ PORUSZANIA SIĘ WÓZKÓW MAGAZYNOWYCH

Wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu prędkości poruszania się wózków magazynowych na bezpieczeństwo pracy dla wszystkich 12 analizowanych scenariuszy (patrz rozdział 8.4.2) zestawiono w tabeli 8.9 i na rys. 8.16. Zestawiono tam wartości wydajności procesu magazynowego, całkowitej długości drogi pokonanej przez wszystkich pracowników oraz liczbę sytuacji potencjalnie niebezpiecznych, które warunkują oczekiwany poziom bezpieczeństwa w analizowanym układzie transportu wewnętrznego. Dodatkowo, na potrzeby dalszych badań, dla każdego z badanych wariantów oszacowano całkowite koszty operacyjne związane z realizacją procesu magazynowego oraz koszty przypadające na pojedyncze zadanie. W ramach kosztów operacyjnych uwzględniono koszty pracy ludzkiej, amortyzacji środków transportu, przeglądów i napraw oraz zużycia energii. Obliczeń dokonano na podstawie metodyk przedstawionych w pracach [4], [179]. Na rys. 8.16 przedstawiono również liczbę sytuacji potencjalnie kolizyjnych dla wszystkich scenariuszy i każdego z 25 eksperymentów symulacyjnych.

Tabela 8.9. Wyniki badań symulacyjnych dotyczących prędkości wózków magazynowych

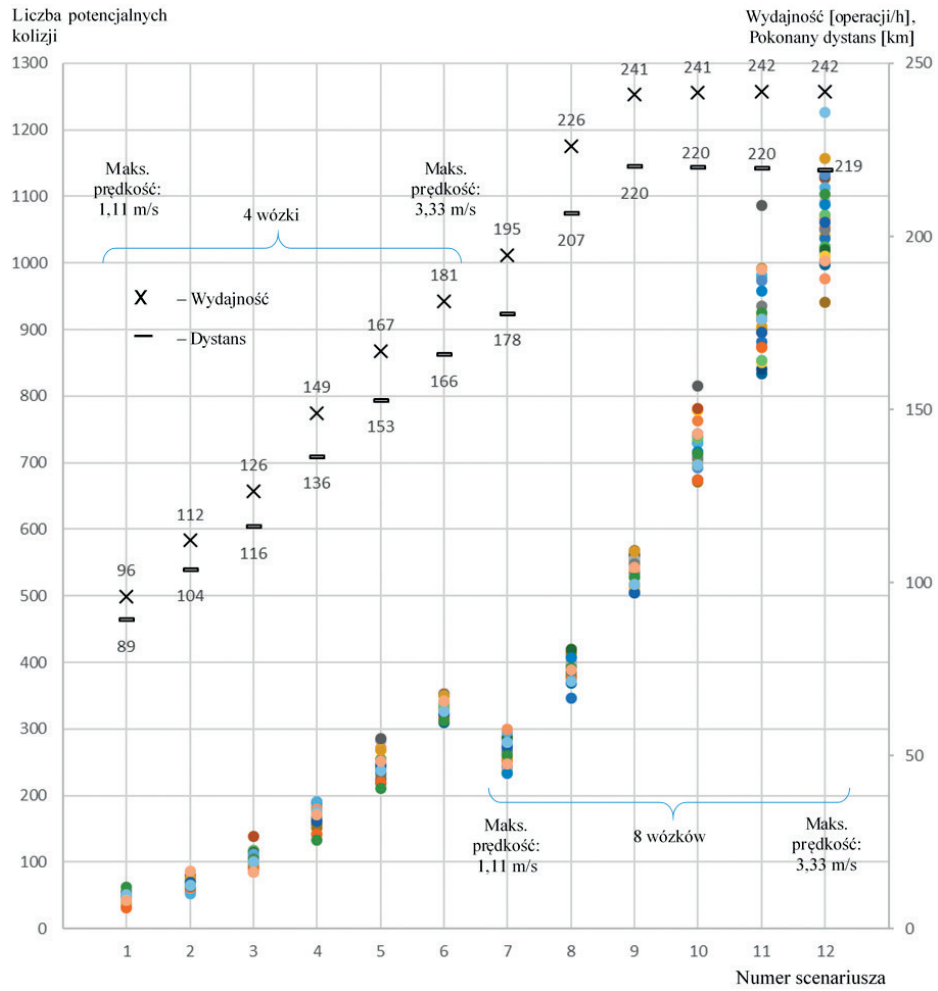
Nr scenariusza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Liczba wózków	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8
Prędkość maksymalna [m/s]	1,11	1,39	1,67	2,22	2,78	3,33	1,11	1,39	1,67	2,22	2,78	3,33
Koszt operacji [PLN/operacje]	0,32	0,28	0,26	0,23	0,21	0,20	0,31	0,28	0,27	0,28	0,29	0,30
Wydajność [jednostek/h]	96	112	126	149	167	181	195	226	241	241	242	242
Pokonany dystans [km]	89	104	116	136	153	166	178	207	220	220	220	219
Liczba potencjalnych kolizji	48	70	102	165	247	331	261	391	538	723	918	1062

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki prezentują przede wszystkim liczbę sytuacji potencjalnie kolizyjnych, które mogą zostać wykorzystane do oszacowania ryzyka wypadku za pomocą formuł uwzględniających prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku w funkcji różnych czynników ludzkich i środowiskowych (lub danych statystycznych – patrz rozdział 4.6). Należy przy tym pamiętać, iż analizowane sytuacje niebezpieczne nie mogą być traktowane jako równoważne wypadkowi – jest to jedynie interakcja między pojazdami w modelowanym systemie magazynowym,

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

jednak zminimalizowanie ich liczby w wyniku odpowiedniej organizacji ruchu i doboru liczby wykorzystywanych zasobów pracy może znacząco zmniejszyć ryzyko wypadku.



Rys. 8.16. Wyniki badań symulacyjnych dotyczących prędkości wózków dla 12 scenariuszy

Źródło: opracowanie własne.

Analiza wyników wskazuje, iż zwiększana liczba wózków wykorzystywanych do realizacji procesów magazynowych w naturalny sposób powoduje wzrost prawdopodobieństwo interakcji między nimi. Jednocześnie zwiększa się wydajność układu. Należy jednak zauważyć, iż niezależnie od analizowanego wariantu (uwzględniającego liczbę urządzeń), w przypadku zastosowania maksymalnej

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

wartości prędkości, liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych jest niemal pięciokrotnie większa niż w wariantach z najmniejszą analizowaną prędkością. Ma to istotny wpływ na prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznych zdarzeń. Zwiększenie prędkości urządzeń prowadzi bowiem do wydłużenia drogi hamowania przyjętej na podstawie badań teoretycznych (patrz tabela 4.2 oraz tabela 4.3). Tym samym prowadzi do rozszerzenia zakresu potencjalnych (ryzykownych) interakcji między wózkami widłowymi.

Zaprezentowane wyniki badań uwzględniające liczbę urządzeń wykorzystanych do realizacji zadań i prędkość ich poruszania się wskazują, jak ważne jest uwzględnianie aspektów bezpieczeństwa na etapie badań i analiz związanych z wydajnością procesu magazynowego. Należy pamiętać, iż zyski wynikające z usprawnień i modernizacji systemów magazynowych powinny zawsze być konfrontowane z zagrożeniami dla ludzkiego życia i zdrowia, które mogą być ich następstwem.

8.6. PORÓWNANIE I PODSUMOWANIE UZYSKANYCH WYNIKÓW

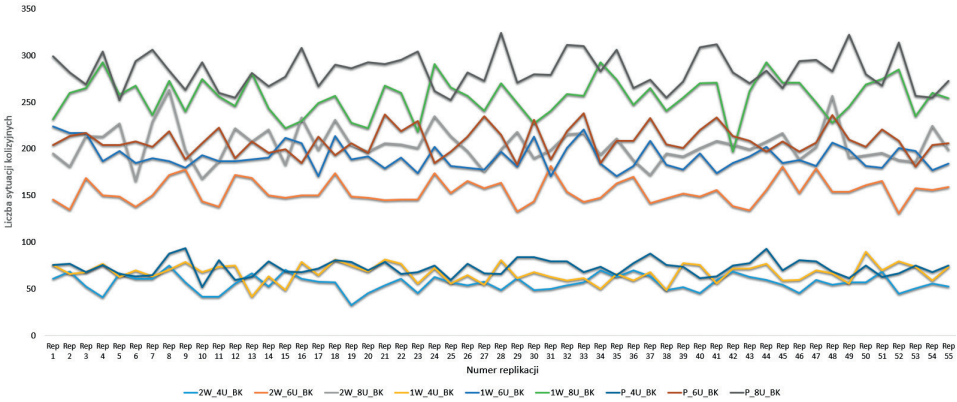
Dla każdego z założonych wariantów (patrz rozdział 8.4) przeprowadzono 55 niezależnych symulacji. W ich wyniku wyznaczano liczbę sytuacji potencjalnie niebezpiecznych dla pracowników magazynowych (sytuacji kolizyjnych), długość drogi jaką sumarycznie w ciągu ośmiu godzin pracy pokonywały wszystkie środki transportu wewnętrznego oraz wydajność układu transportu wewnętrznego (w liczbie jednostek obsłużonych w jednostce czasu – godzinie oraz minucie). W niniejszym rozdziale przeanalizowane zostaną wyniki uzyskane dla wszystkich analizowanych wariantów.

Liczbę sytuacji potencjalnie niebezpiecznych dla każdego wariantu organizacyjnego i dla każdej replikacji w układach trójblokowych strefy rezerw przedstawiono na rys. 8.17. Na jego podstawie możliwe jest zauważenie, że najmniejsza liczba takich sytuacji miała miejsce dla wariantu wykorzystującego 4 wózki widłowe i możliwość poruszania się dwukierunkowo w każdym z korytarzy (19 replikacja). Najwięcej sytuacji potencjalnie niebezpiecznych zaszło w wariancie z ośmioma wózkami i jednokierunkowymi wszystkimi korytarzami w strefie rezerw (28 replikacja).

Dla każdego z trójblokowych wariantów organizacyjnych wyznaczono wartości średnie arytmetyczne liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych, długości sumarycznej drogi pokonywanej wózki widłowe, jak również średnie wydajności układu transportu wewnętrznego (na podstawie wyników dla każdej z 55 replikacji symulacji) – patrz rys. 8.18. Dodatkowo na rys. 8.19–8.21 zestawiono ze sobą te wartości dla wariantów trójblokowych z tą samą liczbą wykorzystywanych

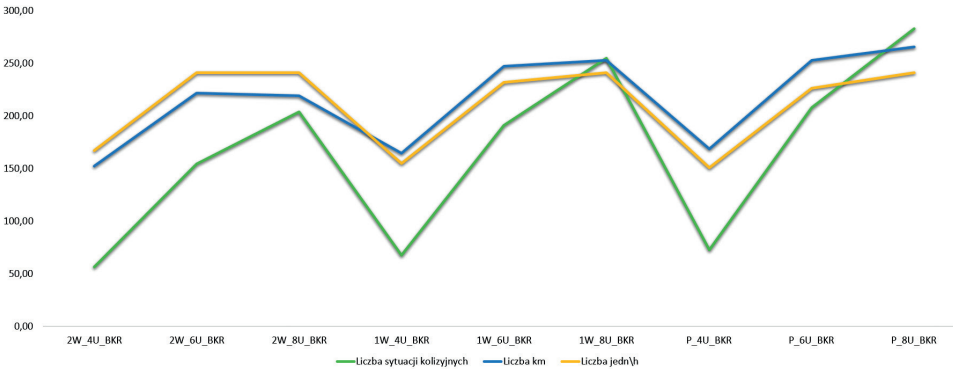
Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

środków transportu i różniących się pomiędzy sobą jedynie organizacją ruchu w strefie rezerw.



Rys. 8.17. Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w różnych wariantach organizacji ruchu dla układu trójblokowego wg poszczególnych replikacji

Źródło: opracowanie własne.

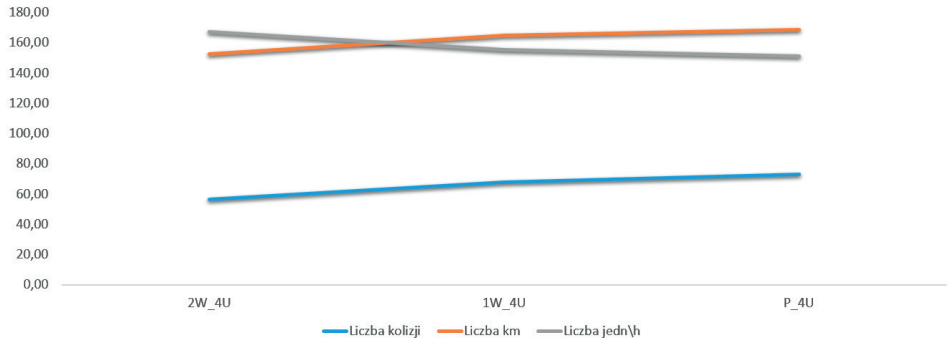


Rys. 8.18. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla poszczególnych wariantów strefy trójblokowej

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku wartości średnich zauważalne jest, iż liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych rośnie wraz z liczbą środków transportu wewnętrznego wykorzystywanych do realizacji procesów magazynowych. Najmniej tych sytuacji miało miejsce dla wariantu 2W_4U_BK, w którym wykorzystano 4 wózki widłowe, poruszające się w sposób dwukierunkowy we wszystkich korytarzach i drogach transportu wewnętrznego.

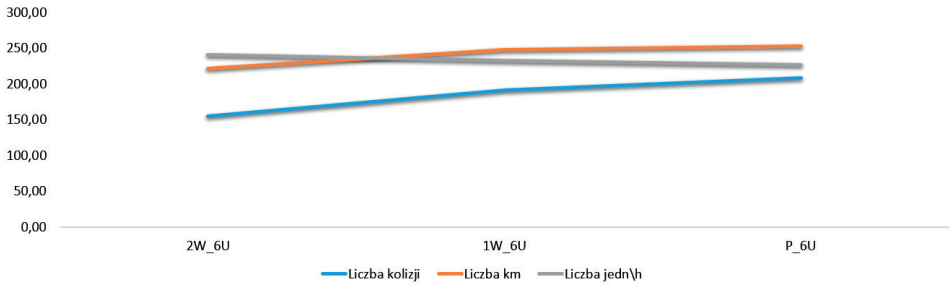
Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 8.19. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie trójblokowej z 4 wózkami

Źródło: opracowanie własne.

Najgorszym rozwiązaniem z punktu widzenia bezpieczeństwa w układzie transportu wewnętrznego okazało się zastosowanie 8 wózków, które poruszają się jednokierunkowo we wszystkich korytarzach (P_8U_BK).

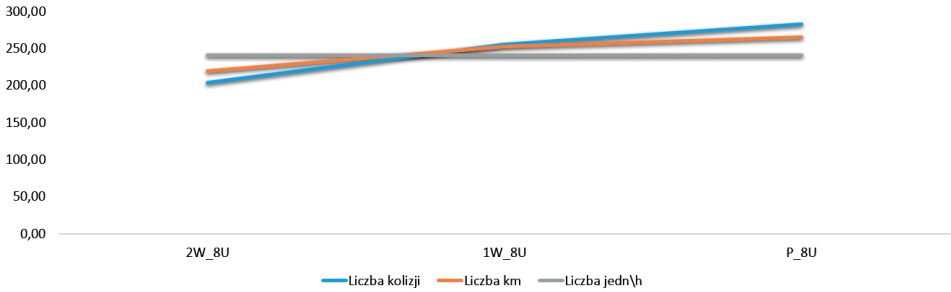


Rys. 8.20. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie trójblokowej z 6 wózkami

Źródło: opracowanie własne.

Na potrzeby porównywania wariantów układu transportu wewnętrznego szczególną uwagę zwrócono na wydajność tego układu. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, iż niezależnie od liczby wykorzystanych urządzeń transportu wewnętrznego najwyższe wartości wydajności układu uzyskiwane były dla organizacji ruchu, w której wózki poruszały się w sposób dwukierunkowy na wszystkich drogach wewnętrznych. W dalszej kolejności ze względu na wydajność klasowały się warianty z jednokierunkowymi korytarzami roboczymi i w końcu z wszystkimi drogami transportu wewnętrznego jednokierunkowymi (patrz rys. 8.19–8.21). Dodatkowo w przypadku wariantu z 8 wózkami widłowymi wzrost wydajności wraz ze zmianą organizacji ruchu jest niemalże niezauważalny.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

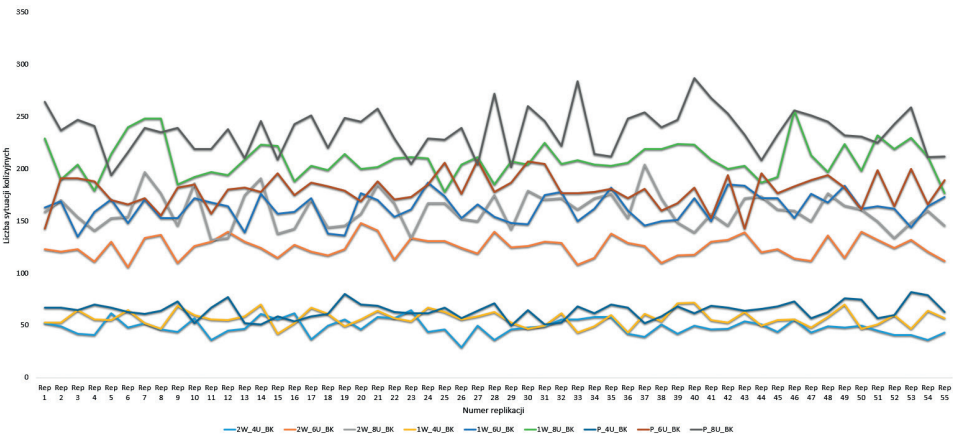


Rys. 8.21. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie trójblokowej z 8 wózkami

Źródło: opracowanie własne.

W prowadzonych badaniach zaproponowano również przeprowadzenie analiz w układzie o innym rozplanowaniu przestrzennym strefy rezerw. W tym celu przygotowany został dodatkowy model obiektu magazynowego, w którym w strefie tej zastosowano dwa bloki regałowe. Aby możliwe było porównanie ze sobą wyników dla różnych układów strefy regałowej pozostawiono w każdym z nich taką samą liczbę dostępnych miejsc składowania. Zmieniła się wobec tego liczba bloków regałowych z 3 na 2 oraz liczba korytarzy roboczych w każdym z bloków, która wzrosła z 4 do 6 sztuk.

Liczbę sytuacji potencjalnie niebezpiecznych dla każdego wariantu organizacyjnego w układzie dwublokowym i dla każdej replikacji symulacyjnej przedstawiono na rys. 8.22.

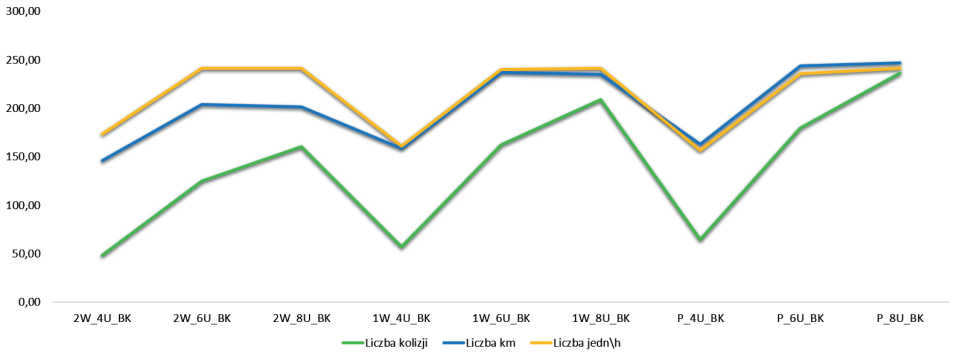


Rys. 8.22. Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w różnych wariantach układu dwublokowego wg poszczególnych replikacji

Źródło: opracowanie własne.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

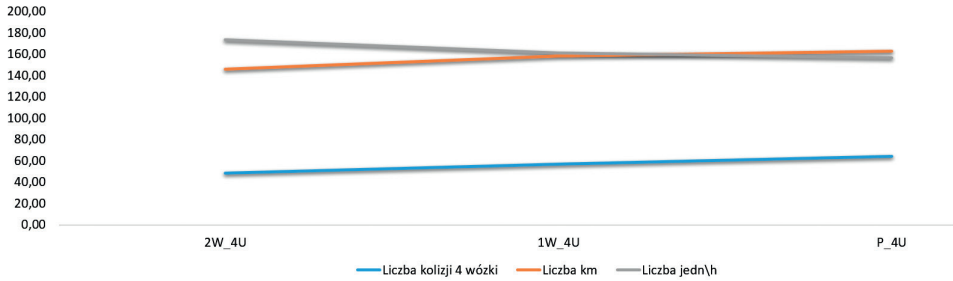
Dla każdego układu dwublokowego (podobnie jak w przypadku wariantów trójblokowych) wyznaczono wartości średnie arytmetyczne liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych, długości sumarycznej drogi pokonywanej przez wózki widłowe, jak również średnie wydajności układu transportu wewnętrznego (na podstawie wyników dla każdej z 55 replikacji symulacji) – rys. 8.23.



Rys. 8.23. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla poszczególnych wariantów strefy dwublokowej

Źródło: opracowanie własne.

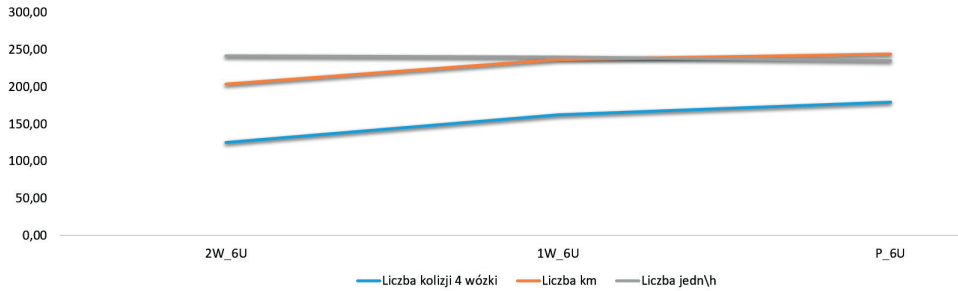
W przypadku układów dwublokowych, podobnie jak w układach trójblokowych, wzrost liczby wykorzystanych środków transportu wewnętrznego jest tożsamy ze wzrostem liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych (patrz rys. 8.22–8.26). Najmniej tego typu sytuacji miało miejsce dla wariantu 2W_4U_BK, w którym wykorzystano 4 wózki widłowe, poruszające się w sposób dwukierunkowy we wszystkich korytarzach i drogach transportu wewnętrznego, natomiast najwięcej dla wariantu P_8U_BK.



Rys. 8.24. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie dwublokowej z 4 wózkami

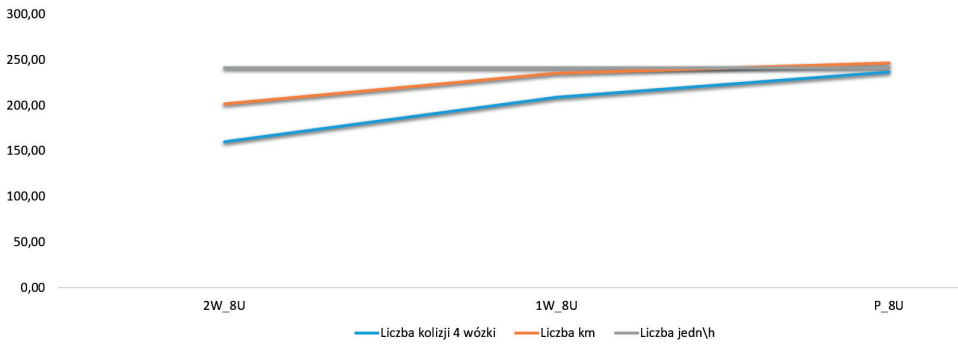
Źródło: opracowanie własne.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363



Rys. 8.25. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie dwublokowej z 6 wózkami

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.26. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie dwublokowej z 8 wózkami

Źródło: opracowanie własne.

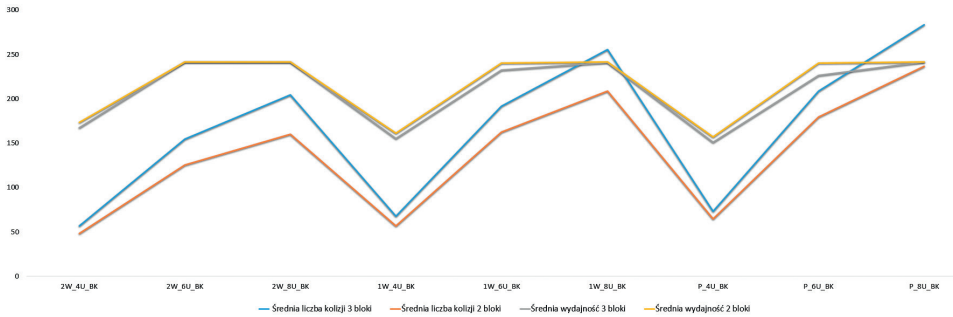
Dodatkowo analiza wyników dla układów dwublokowych wykazała, iż dla każdej liczby wykorzystanych urządzeń wydajność układu w poszczególnych wariantach organizacji ruchu zmienia się nieznacząco (maleje kolejno dla wariantów o ruchu dwukierunkowym, następnie jednokierunkowym w korytarzach roboczych i w końcu jednokierunkowym na wszystkich drogach transportu wewnętrznego) – patrz rys. 8.24–8.26.

Dla porównania pod względem bezpieczeństwa i wydajności układów dwublokowych z trójblokowymi zestawiono ze sobą wszystkie uzyskane podczas badań wyniki (dla wartości średnich rys. 8.27 i dla poszczególnych symulacji – rys. 8.28). Na ich podstawie można wnioskować, iż lepszymi wydają się układy dwublokowe. Takie stwierdzenie jest podyktowane tym, iż dla wszystkich wariantów organizacyjnych liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych jest mniejsza w przypadku układów dwublokowych (rys. 8.27 oraz rys. 8.28). Tym samym

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

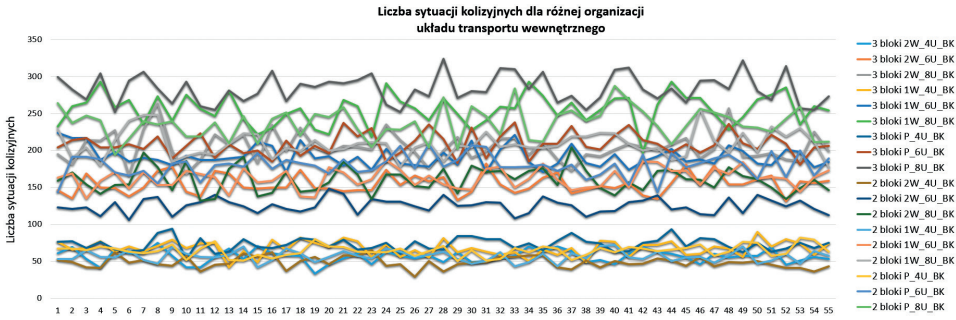
niższy jest w ich przypadku oczekiwany poziom bezpieczeństwa pracowników magazynowych.

Porównanie wartości wydajności układu transportu wewnętrznego dla różnych układów strefy rezerw wskazuje, iż dla większości wariantów wykorzystujących układy dwublokowe jak i trójblokowe wartości te są niemal identyczne. W kilku przypadkach (np. P_4U_BK, 1W_4U_BK) wyższa wydajność układu transportu wewnętrznego jest dla wariantu dwublokowego (rys. 8.27 oraz rys. 8.28).



Rys. 8.27. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla wszystkich wariantów

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.28. Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych dla wszystkich wariantów układu transportu wewnętrznego

Źródło: opracowanie własne.

Na potrzeby prowadzonych badań założono, że oceny bezpieczeństwa pracowników magazynowych można dokonać z wykorzystaniem modelowania symulacyjnego. W tym celu opracowano modele symulacyjne różnych wariantów organizacyjnych układów transportu wewnętrznego, w których następnie

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

symulowano pracę wózków widłowych. Przeprowadzone badania symulacyjne i uzyskane wyniki wskazały, iż przedstawione założenia są zasadne i badania symulacyjne mogą znacząco pomóc przy ocenie bezpieczeństwa pracowników magazynowych. Możliwe jest to dzięki identyfikacji liczby sytuacji kolizyjnych w układach transportu wewnętrznego, które mogą zakończyć się kolizją środków transportu wewnętrznego, wypadkiem, a w ich konsekwencji utratą życia bądź zdrowia pracowników magazynowych. Założono, że wraz ze wzrostem liczby takich sytuacji maleje bezpieczeństwo w analizowanym układzie.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

9 PODSUMOWANIE

W monografii podjęto problematykę modelowania procesów magazynowych w aspekcie badania wydajności i bezpieczeństwa pracy w magazynach. Jej pośrednim celem, oprócz opracowania sformalizowanej metodyki oceny procesów magazynowych ze względu na wydajność i bezpieczeństwo, było zwrócenie uwagi na ogrom zagrożeń, na które narażeni są pracownicy magazynowi w wyniku ciągłego dążenia do zwiększania wydajności i efektywności obiektów, w których pracują. W pracy wskazano, iż należy poszukiwać kompromisów, które umożliwią realizację procesu magazynowego w sposób sprawny i efektywny przy jednoczenym zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa i jakości oferowanych usług.

Praca nad teoretycznymi aspektami modelowania obiektów magazynowych i realizowanych w nich procesów logistycznych pozwoliła na opracowanie sformalizowanego języka opisu umożliwiającego odwzorowanie dowolnego magazynu. Wobec tego opracowany model formalny pozwala na odwzorowanie:

- obiektów magazynowych i procesów magazynowych dla różnorodnych sytuacji decyzyjnych związanych ze zwiększaniem bezpieczeństwa pracy przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności i efektywności procesów,
- struktury magazynu, w tym struktury fizycznej określonej przez technologie składowania i technologie transportu wewnętrznego oraz struktury funkcjonalnej,
- zasad organizacji pracy ludzi i urządzeń w magazynie,
- charakterystyk elementów struktury obiektu magazynowego, jego wyposażenia i realizowalnych zadań logistycznych,
- ograniczeń i warunków dotyczących oceny wydajności i bezpieczeństwa realizacji zadań magazynowych,
- wskaźników oceny i kryteriów realizacji zadań logistycznych w aspekcie bezpieczeństwa, wydajności i efektywności realizacji zadań.

Praca w obszarze praktycznego wykorzystania proponowanej metodyki modelowania obiektów magazynowych pozwala na komputerową implementację

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

proponowanego podejścia. Umożliwia to podejmowanie decyzji optymalnych lub bliskich optymalnym w obszarze badań wydajności procesów magazynowych i bezpieczeństwa pracy w obiektach magazynowych.

Przedstawiona metodyka modelowania obiektów magazynowych i jej aplikacje mogą służyć analizie rozwiązań projektowych i organizacyjnych magazynów z uwzględnieniem różnych punktów widzenia. Na ich bazie możliwe jest przeprowadzenie symulacji wpływu podejmowanych decyzji na wydajność, efektywność i bezpieczeństwo pracy w obiektach magazynowych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

LITERATURA

1. Abt S.: Centra dystrybucji a infrastruktura, Logistyka a jakość, nr 2 (8), s. 38-40.
2. Abt S.: Logistyka w teorii i praktyce, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, 2001.
3. Ackoff R.W.: Decyzje optymalne w badaniach stosowanych, PWN, Warszawa 1968.
4. Al-Shaebi A.: The effect of forklift driver behaviour on energy consumption and productivity, Procedia Manufacturing, Vol. 11, 778-786, 2017.
5. Ambroziak T., Jacyna M.: Queueing theory approach to transport processes dynamics. Part I. Dynamics of transport network connections, Archives of Transport, vol. 14, iss 4, Instytut Technologii Eksploatacji, Warszawa 2002.
6. Ambroziak T., Jacyna M.: Queueing theory approach to transport processes dynamics. Part II. Parameters of transport processes dynamics. Archives of Transport, vol. 15, iss 1, Instytut Technologii Eksploatacji, Warszawa 2003.
7. Ambroziak T., Jacyna M.: Wybrane aspekty modelowania dynamiki procesów transportowych, Prace Naukowe PW, Transport, z. 53, Oficyna Wydawnicza PW.
8. Ambroziak T., Lewczuk K.: Metoda wielokryterialna w zastosowaniu do oceny konfiguracji strefy składowania, AUTOMATYKA, Półrocznik, tom 13, z. 2 s. 161-168, Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
9. Ambroziak T.: Modelowanie procesów technologicznych w transporcie, OWPW, Prace Naukowe PW, Transport, z. 40, Warszawa 1998.
10. Ambroziak T.: O pewnych aspektach modelowania systemów transportowych, OWPW, Prace Naukowe PW, Transport, z. 37, Warszawa 2000.
11. Analiza i ocena ryzyka zawodowego osób, Materiały udostępnione przez Regionalne Centrum Rozwoju Edukacji, http://www.rcre.pl/pliki/ryzyko%20metody.pdf
12. Analiza nieszczęśliwych wypadków i niebezpiecznych uszkodzeń technicznych objętych dozorem technicznym. Dozór Techniczny, 2001-2011.
13. Apanowicz J.: Metodologia ogólna, Wydawnictwo Diecezji IVlplińskiej „BERNARDINUM", Gdynia 2002
14. Augustyńska D., Pośniak M. (red.): Czynniki szkodliwe w środowisku pracy. CIOP-PIB, Warszawa 2007.
15. Baker P., Canesa M., Warehouse design: A structured approach, European Journal of Operational Research 193, 2009, s. 425–436.
16. Banks J., Carson J., Nelson B., Nicol D.: Discrete event system simulation. International Series in Industrial and Systems Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2010.
17. Bard J. F., Morton D. P., Wang Y. M.: Workforce planning at USPS mail processing and distribution centers using stochastic optimization, Ann Oper Res 155: s. 51–78, 2007.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

18. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D., Foley R.D.: Performance of bucket brigades when work is stochastic. Operations Research 49, 2001.
19. Bartholdi J.J., Hackman S.T., Warehouse & Distribution Science, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2016.
20. Basan Y. Roll, Y. & Rosenblatt M. J., Internal layout design of a warehouse, AIIE Transactions, Vol. 12 No. 4, 1980, s. 317–322.
21. Basiewicz T., Nowosielski L.: Procesy rozwoju systemu transportu kolejowego, WKiŁ, Warszawa 1978.
22. Beamon B. M.: System reliability and congestion in a material handling system, Computers & Industrial Engineering 36, 1999, s. 673-684.
23. Benes J.: Teoria systemów. PWN, Warszawa 1979.
24. Berry J.R.: Elements of warehouse layout, „International Journal of Production Research", Vol. 7 No. 2, 1968, s. 105–121.
25. Bittel L.R.: Krótki kurs zarządzania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
26. Blaik P.: Logistyka, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2001.
27. Blaik P.: Logistyka: koncepcja zintegrowanego zarządzania, Wyd. 4 zmienione, Warszawa 2017.
28. Boryczka M.: Programowanie mrowiskowe w procesie aproksymacji funkcji, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2006.
29. Bozer Y.A., Cho M: Throughput performance of automated storage/retrieval systems under stochastic demand. IIE Transactions 37, 2005.
30. Bozer Y.A., Park J.H.: Expected move request waiting times in single-device, polling-based material handling systems. IIE Transactions 33, 1999.
31. Bozer Y.A., White J.A.: Design and performance models for end-of-aisle order picking systems. Management Science 36, 1999.
32. Bryła R.: Bezpieczne stanowisko pracy. ELAMED, Katowice 2007.
33. Brzeziński M.: Logistyka w przedsiębiorstwie, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa 2007.
34. Bukchin Y., Khmelnitsky E., Yakuel P.: Optimizing a dynamic order-picking process, European Journal of Operational Research, vol. 219, Iss. 2, 2012, s. 335–346.
35. Bukowski L., Karkula M.: Symulacja przepływu materiałów i informacji w zautomatyzowanych centrach dystrybucyjnych, Systemy logistyczne. Teoria i Praktyka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
36. Bukowski L.: System of systems dependability –Theoretical models and applications examples, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 151, 2016, s. 76–92.
37. Bukowski L.: Zapewnianie ciągłości dostaw w zmiennym i niepewnym otoczeniu, Wyższa Szkoła Biznesu w Dąbrowie Górniczej, Dąbrowa Górnicza, 2016.
38. Chang S.Y., Yeh T.Y.: Optimal order quantity and product modularity for a two-echelon returnable supply chain. International Journal of Production Research, Vol. 51, No 17, 2013, s. 5210-5220.
39. Chen H.-K., Hsueh C.-F., Chang M.-S.: The real-time time-dependent vehicle routing problem, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 42, Iss. 5, Pp. 383-408, 2006.
40. Chew E.P., Tang L.C.: Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse. European Journal of Operational Research 112, 1999.
41. Chojnacki A.B.: Modelowanie matematyczne, WAT, Warszawa 1986.
42. Chojnacki T.: Instruktaż do bezpiecznej pracy w magazynie. Porady praktyczne. Materiały firmy ESPERTO, www.esperto.eu.com
43. Chojnacki T.: Porządek ruchu cz.1. ABC Magazyniera, nr 2/2013.
44. Chung S. H., Chan H. K., Chan F. T. S.: A modified genetic algorithm for maximizing handling reliability and recyclability of distribution centers. Expert Systems with Applications, Vol. 40, Iss. 18, 2013, s. 7588-7595.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

45. Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V.: Distributed optimization by ant colonies, Appeared in Proceedings of ECAL92, Paris 1992.
46. Cormier G., Gunn E. A.: Modelling and analysis for capacity expansion planning in warehousing, Journal of the Operational Research Society 50(1), 1999, s. 52-59.
47. Cormier G., Gunn E. A.: Simple models and insights for warehouse sizing, Journal of the Operational Research Society 47(5), 1996, s. 690-696.
48. Coyle J.J., Bardi E.J., Langley C.J.: Zarządzanie logistyczne, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2007.
49. Coyle J., Bardi E.J., Langley C.J.: The management of business logistics, St. Paul MN: West, 1996.
50. Coyle J., Bardi E. J., Langley C. J.: The management of business logistics, St. Paul MN: West, 1996.
51. Daganzo C.,F.,: The productivity of multipurpouse seaport terminals, Transportation Science, 24(3), 1990.
52. Davenport T. H.: Process Innovation: Reengineering Work Through Information Technology, Harvard Business School, Boston 1993.
53. Dąbrowa-Bajon M. i in.: Zasady projektowania systemów i urządzeń sterowania ruchem kolejowym, WKiŁ, Warszawa 1981.
54. De Koster M.B.M., Van der Poort E.S., Wolters M.: Efficient order batching methods in warehouses, International Journal of Production Research 37(7), 1999, s. 1479-1504.
55. De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen K. J.: Design and control of warehouse order picking: A literature review, EJoOR European Journal of Operational Research, Vol. 182, Iss. 2, 2007, s. 481–501, 16.
56. De Koster, Van der Poort E.S.: Routing orderpickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions, IIE Transactions 30, 1998.
57. De Weille J. and Ray A.: The optimum port capacity, Journal of Transport Economics and Policy, 8(3), 1974.
58. Dohn K., Kwiatkowska A.: Analiza przepływów materiałowych i informacyjnych w przedsiębiorstwie – mapowanie strumienia wartości, „Czasopismo Logistyka, Nr 4, 2008, artykuł na CD.
59. Dolgui A., Soldek J., Zaikin O.: Applied Optimization: Supply Chain Optimization, Product/Process Design, Facility Location and Flow Control, 2005, Sprinter Science + Business Media, Inc., Boston.
60. Donath B., Mazel J., Dubin C., Patterson P. (red.): The IOMA Handbook of Logistics and Inventory Management, John Willey & Sons, Inc., New York, 2002.
61. Dorigo M., di Caro G.: The ant colony optimization meta-heuristic. David Corne, Marco Dorigo, Fred Glover, redaktorzy, New Ideas in Optimization., McGraw-Hill, London 1999.
62. Dorigo M., Gambardella L.M.: Ant Colony System: a Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem, IEEE Transactions on Evolutionary Computation-Vol. 1,No. 1,pp. 53-66, 1997.
63. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A.: Positive feedback as a search strategy. Technical Report 91-016, 1991.
64. Dorigo M., Socha K.: An introduction to ant colony optimization, Technical Report TR/IRIDIA/2006-010, 2006.
65. Drury C.G.: Predictive models for setting safe limits in manual materials handling, International Journal of Production Research 13(6), 1975, s. 529-539.
66. Drury J.: Towards more efficient order picking, IMM monograph No.1, The Institute of Materials Management, Cranfield, 1988 European Journal of Operational Research, 177 (1), 2007
67. Dukic G., Oluic C.: Order-picking routing policies: Simple heuristics, advanced heuristics or optimal algorithm, Strojniski Vestnik – Journal of Mechanical Engineering 50(11), 2004, s. 530-535.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

68. Dukic G., Opetuk T., Lerher L.: A throughput model for a dual-tray Vertical Lift Module with a human order-picker, International Journal of Production Economics, Volume 170, Part C, 2015, 874-881.
69. DYREKTYWA 2006/42/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 17 maja 2006 r w sprawie maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE.
70. Evans G.W., Wallace G.,F., Sutherland G.L.: Symulacja w maszynach cyfrowych, WNT, Warszawa 1973.
71. Fall restraints on order picking forklifts, A Health and Safety Solution, Work Safe Victoria.
72. Fechner I. red.: Zarządzanie łańcuchem dostaw, Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań 2007.
73. Fertsh M. red.: Słownik terminologii logistycznej, ILiM, Poznań 2006.
74. Fijałkowski J.: Controlling w praktyce projektowej obiektów logistycznych [w:] Conference Proceedings Carpathian Logistics Congress / Feliks Jerzy (red.), 2013, Tanger, s. 1–9.
75. Fijałkowski J.: Kształtowanie i wymiarowanie procesów przepływu ładunków i informacji w systemach logistycznych, Systemy Logistyczne. Teoria i Praktyka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, s. 9–21.
76. Fijałkowski J., Transport wewnętrzny w systemach logistycznych. Wybrane zagadnienia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
77. Fijałkowski J.: Technologia magazynowania. Wybrane zagadnienia, OWPW, Warszawa, 1995.
78. Findeisen W. i in.: Analiza systemowa – podstawy i metodologia, PWN, Warszawa, 1975.
79. Fishman G.S.: Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody, PWE, Warszawa 1981.
80. Fishman G.S: Symulacja cyfrowa. Koncepcje i metody, PWE, Warszawa 1981.
81. Forklift safety – reducing the risks; Government of South Australia, 2010.
82. Forklift safety reducing the risk – 2ne edition, WORKSAFE VICTORIA, February, 2006.
83. Frazelle E.H., Hackman S.T., Pasy U., Platzman L.K.: The forward-reserve problem, [w:]: Optimization in Industry 2, T. C. Ciriani, R. C. Leachman (eds.), Wiley, 1994, s. 43-61.
84. Frazelle E.: World-Class Warehousing and Material Handling, McGraw-Hill 2002.
85. Gademann A.J.R.N., Van de Velde S.: Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse, IIE Transactions 37, 2005.
86. Goetschalckx M., Ashayer J.: Classification and design of order picking, Logistics World JUNE 1989, Emerald Backfiles 2007.
87. Gong Y., De Koster R.: A polling-based dynamic order picking system for online retailers, IIE Transactions, vol. 40, Iss. 11, 2008, s. 1070-1082.
88. Gordon G.: Symulacja systemów, WNT, Warszawa 1974.
89. Gray A.E., Karmarkar U.S., Seidmann A.: Design and operation of an order consolidation warehouse: models and application, European Journal of Operational Research 58(1), 1992, s. 14-36.
90. Griese J., Sieber P.: Betriebliche Geschäftsprozesse: Grundlagen Beispiele Konzepte, Bern, Stuttgart, Wien: Haupt 1999.
91. Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L.F.: Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review, European Journal on Operational Research 203, 2010, s. 539–549.
92. Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L.F.: Research on warehouse operation.: a comprehensive review, European Journal of Operational Research, 177 (1), 2007.
93. Gue K.R., Meller R.D., Skufca J.D.: The effects of pick density on order picking areas with narrow aisles. IIE Transactions 38, 2006.
94. Gutenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów, PWN, Warszawa-Łódź 1978.
95. Gwarek H., Piwowar A.: Organizacja gospodarki materiałowej w toku produkcji, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1965.
96. Gwynne R.: Zarządzanie logistyką magazynową, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

97. Hackman S.T., Rosenblatt M.J.: Allocating items to an automated storage and retrieval system, IIE Transactions 22, 1990.
98. Hall N.G.: Distance approximation for routing manual pickers in a warehouse, IIE Transactions, 1993.
99. Halusiak S.: Ocena niebezpiecznych zdarzeń przy pracy z wykorzystaniem wózków jezdniowych podnośnikowych, Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka, nr 6, 2012.
100. Hart P.E.; Nilsson N.J., Raphael B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 4 (2): 100–107, 1968.
101. Hasan M.D., Mohsen, A framework for the design of warehouse layout, Emerald. Facilities vol. 20, Number 13/14, s. 432-440, MCB UP Limited, 2002.
102. Hatton G. Designing a warehouse or distribution center. Gattorna, J. L. (Ed), The Gower Handbook of Logistics and Distribution Management. Fourth ed. Gower Publishing, Alderschot, 1990, s. 173-193.
103. Hatton G. Warehouse Management. Automation and Organisation of Warehouse and Order Picking Systems, Berlin, Springer-Verlag, 2007.
104. Horst W.: Ryzyko zawodowe na stanowisku pracy. Cz. I. Ergonomiczne czynniki ryzyka. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
105. Hozer J.: Mikroekonometria. Analizy, diagnozy, prognozy. PWE, Warszawa 1993.
106. Hsieh L., Tsai L.: The optimum design of a warehouse system on order picking efficiency, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 28(5-6), 2006, s. 626-637.
107. Hsieh S., Hwang J. S., Chou H. C.: A Petri-net-based structure for AS/RS operation modelling. International Journal of Production Research 36, 1998.
108. Izdebski M.: The use of heuristic algorithms to optimize the transport issues on the example of municipal services companies, Archives of Transport, vol. 29, iss. 1, 2014.
109. Jachimowski R.: Zastosowanie algorytmów heurystycznych do rozwiązywania problemu układania tras pojazdów, Logistyka 2/2015, s. 242-250.
110. Jachimowski R., Gołębiowski P., Pyza D.: Kształtowanie baz danych dla wizualizacji obiektów magazynowych w 3D, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
111. Jachimowski R., Szczepański E., Sieci Petriego w analizie problemu wyznaczania tras pojazdów, Logistyka, Nr 4, 2014, 1885-1892.
112. Jachimowski R.: Ocena funkcjonowania terminali intermodalnych w aspekcie realizowanych procesów transportowo-przeładunkowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018.
113. Jacyna M., Wiśniewski K.: A static model for selecting technical facilities of a logistics centre based on the tasks to be performed. TOTAL LOGISTIC MANAGEMENT. No. 1, 2008, s. 33–42.
114. Jacyna M., Bobiński A., Lewczuk K.: Modelowanie i symulacja 3D obiektów magazynowych, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2017.
115. Jacyna M.: Distribution Warehouses and Realization of Logistic Processes in Supply Chains. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
116. Jacyna M., Kłodawski M.: Wpływ układu strefy komisjonowania na długość drogi kompletowania, Logistyka 4/2010, s. 18.
117. Jacyna M., Lewczuk K., Kłodawski M.: Technical and organizational conditions of designing warehouses with different functional structures, Journal of KONES Powertrain and Transport, Institute of Aviation (Aeronautics) BK, Warszawa, Vol. 22, No. 3, 2015, s. 49–58.
118. Jacyna M., Lewczuk K.: Projektowanie systemów logistycznych, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2016.
119. Jacyna M.: Model Systemu Logistycznego Polski. Uwarunkowania techniczno-technologiczne komodalności transportu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

120. Jacyna M., Wasiak M.: Badania symulacyjne przepływu strumieni ładunków w obiektach logistycznych [w:] Nader M., Tylikowski A. (red.), Symulacja w Badaniach i Rozwoju, XII Warsztaty Naukowe Polskiego Towarzystwa Symulacji Komputerowej, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa 2006, s. 110–116.
121. Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Kłodawski M.: Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport, Archives of Transport, vol. 31, iss. 3, 2014.
122. Jacyna M.: Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych. Prace Naukowe PW – Transport, z.47, Oficyna Wyd. PW, Warszawa 2001.
123. Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych, OWPW, Warszawa 2009.
124. Jacyna M.: Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych, OWPW, Warszawa 2009.
125. Jacyna M., Lewczuk K., Jachimowski R.: The selected aspects of spatial arrangement of warehouse functional areas. Proceedings of MOTSP 2016, June 2016, Poreč, Istria, Croatia.
126. Jacyna-Gołda I.: Evaluation of operational reliability of the supply chain in terms of the control and management of logistics processes [w:] Safety and Reliability: Methodology and Applications / Nowakowski T. [i in.] (red.), 2015, CRC Pres Taylor & Francis Group.
127. Jacyna-Gołda I., Lewczuk K., Szczepański E., Murawski J.: Computer Aided Implementation of Logistics Processes – Selected Aspects [w:] Tools of Transport Telematics / Mikulski Jerzy (red.), Springer, 2015, s. 1–14.
128. Jacyna-Gołda I.: Wspomaganie decyzji w łańcuchach dostaw w aspekcie oceny efektywności realizacji zadań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2016.
129. Jacyna-Gołda I., Żak J., Gołębiowski P.: Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system, Archives of Transport, vol. 32, iss. 4, 2014.
130. Jacyna-Gołda I., Żak J.: Using queue theory to analysis and evaluation of the logistics centre workload, Archives of Transport, vol. 25, Iss.1-2, 2013, s. 117-135.
131. Jacyna-Gołda I., Żak J., Wasiak M.: Efficiency as an assessment measure of warehouse facilities location in logistics network, Journal of KONES, Institute of Aviation, vol. 22, nr 3, 2015, s. 59-67.
132. Jacyna-Gołda, I., Lewczuk, K.: The method of estimating dependability of supply chain elements on the base of technical and organizational redundancy of process. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. Vol. 19 No. 3, 382-392, 2017.
133. Jonkisz J., Łabuda I., Prykowski J.: Ocena ryzyka zawodowego na stanowiskach pracy, Górnictwo Odkrywkowe, nr 6/2016.
134. Karczewski J.T.: System zarządzania bezpieczeństwem pracy. ODDK, Gdańsk 2000.
135. Karkula M.: Modelowanie i symulacja procesów logistycznych. Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Kraków 2013.
136. Karkula M.: Selected aspects of simulation modelling of internal transport processes performed at logistics facilities. The Archives of Transport, Vol. 30, Iss. 2, s. 43-56, 2014.
137. Kisperska-Moroń D., Krzyżaniak S. (red.): Logistyka, „Biblioteka Logistyka", Poznań 2009.
138. Klir G.J.: Ogólna teoria systemów. WNT, Warszawa 1976.
139. Kłodawski M., Jachimowski R.: Ant algorithms for designing order picking systems [w:] Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, nr 97, 2013, s. 259-269.
140. Kłodawski M., Jacyna M.: Selected aspects of research on order picking productivity in aspect of congestion problems, ICIL 2012, International Conference on Industrial Logistics 2012, Zadar, Croatia, 15th June 2012, Conference Proceedings, 2012.
141. Kłodawski M., Jacyna M.: Wybrane aspekty badania wydajności procesu komisjonowania, Logistyka Nr 2, 2012.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

142. Kłodawski M., Jacyna-Gołda I.: Work safety in order picking processes, w: 19th International Conference Transport Means 2015. Proceedings / Kersys Robertas (red.), 2015, Publishing House „Technologija", ss. 310-316.
143. Kłodawski M., Lewczuk K.: Some aspects of improving order picking process. Materiały konferencyjne, s. 494-499, III Carpathian Logistics Congress, 9-11 grudnia 2013, Kraków, Polska. Published: 2014.
144. Kłodawski M., Lewczuk K., Szczepański E.: Simulation analysis of pallet rack system with shuttle trucks. Materiały konferencyjne Carpathian Logistics Congress – CLC 2016, Zakopane 2016.
145. Kłodawski M., Wasiak M., Żak J.: Modelowanie procesów magazynowych w wybranych strefach magazynu z zastosowaniem narzędzi wizualizacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
146. Kłodawski M., Żak J.: Order picking area layout and its impact on efficiency of order picking process, Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 1, No. 1, March 2013, 41-46, Engineering and Technology Publishing, 2013.
147. Kłodawski M.: Klasowe metody rozmieszczenia asortymentu i ich wpływ na wydajność procesu kompletacji, Logistyka, Nr 4, 2012.
148. Kłodawski M.: Metoda badania procesu komisjonowania w zależności od rozmieszczenia artykułów w strefie kompletacji w obiektach logistycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
149. Kołodziński E.: Symulacyjne metody badania systemów, PWN, Warszawa 2002.
150. Kondratowicz L.: Modelowanie symulacyjne systemów, WNT, Warszawa 1978.
151. Konieczny J.: Inżynieria systemów działania, WNT, Warszawa 1983.
152. König D., Stoyan D.: Metody teorii obsługi masowej, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
153. Koradecka D. (red.): Bezpieczeństwo i higiena pracy. CIOP-PIB, Warszawa 2008.
154. Korzeb J., Chudzikiewicz A.: Evaluation of the vibration impacts in the transport infrastructure environment – summary, [w:] 8th German-Greek-Polish Symposium on Recent Advances in Mechanics, Book of Abstract / Kienzler R., Boettcher S. (red.), University of Bremen, 2013, s. 33-34.
155. Korzeń Z.: Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania. Tom II, Biblioteka Logistyczna.
156. Kostrzewski M.: Application of simulation method in analysis of order-picking processes in a high-rack warehouse, Research in Logistics & Production, vol. 6, nr 4, 2016, s. 309-319.
157. Kowalczyk Cz.: Jak ocenić ryzyko zawodowe, Państwowa Inspekcja Pracy Główny Inspektorat Pracy, Warszawa 2010.
158. Kowalska K.: Efektywność procesów logistycznych [w]: Kowalska K., Markusik S., Sprawność i efektywność zarządzania łańcuchem dostaw. WSzB w Dąbrowie Górniczej, Dąbrowa Górnicza 2011.
159. Koziej S.: Bezpieczeństwo: istota, podstawowe kategorie i historyczna ewolucja, Bezpieczeństwo Narodowe, nr 2, 2011.
160. Krause M.: Ocena ryzyka zawodowego – wymagania, wytyczne, przykłady. WISBiOP, Radom 2008.
161. Krause M.: Praktyczne aspekty doboru metod oceny ryzyka zawodowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i zarządzanie, zeszyt. 59.
162. Krause M.: Praktyczne aspekty doboru metod oceny ryzyka zawodowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i zarządzanie, zeszyt. 59.
163. Krzyżaniak S., Niemczyk A., Majewski J., Andrzejczyk P.: Organizacja i monitorowanie procesów magazynowych, Biblioteka Logistyka, Poznań 2014.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

164. Larsson T.J., Horberry T., Brennan T., Lambert J., Johnston I.: A guidebook of industrial traffic management & forklift safety, Accident Research Centre Monash University Victoria 3800, Australia 2003.
165. Le-Duc T., De Koster M.B.M.: Travel distance estimation and storage zone optimization in a 2-block class-based storage strategy warehouse. International Journal of Production Research 43, 2005.
166. Lee F.H.: Performance analysis for automated storage and retrieval systems. IIE Transactions 29, 1997.
167. Lee H. L., Lee M. H., Hur L. S.: Optimal design of rack structure with modular cell in AS/RS, International Journal of Production Economics, Vol. 98 No. 2, 2005, s. 172-178.
168. Legato P., Canonaco P., Mazza R.: Yard crane management by simulation and optimization, Maritime Economics & Logistics, 2009, 11(1).
169. Leszczyński J.: Modelowanie systemów i procesów transportowych, OWPW, Warszawa 1994.
170. Lewczuk K., Żak J., Pyza D., Jacyna-Gołda I.: Vehicle routing in an urban area: environmental and technological determinants, Urban Transport XIX, vol. 130, WIT Press, 2013, 373-384.
171. Lewczuk K., Ambroziak T.: Warehousing process scheduling in warehouse efficiency and reliability assessment. Proceeding of 19th International Scientific Conference. Transport Means 2015. Kaunas University of Technology, Lithuania, October 22-23, 2015, s. 17–26.
172. Lewczuk K.: Decision making in shaping racking constructions in storage areas of industrial warehouses, Logistyka 2/2015, s. 500-508.
173. Lewczuk K.: Dependability Issues in designing warehouse facilities and their functional areas, Journal of KONBiN 2(38) 2016, s. 201–228.
174. Lewczuk K., Jacyna M., Bobiński A.: Kształtowanie obiektów magazynowych w aspekcie wizualizacji w 3D, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
175. Lewczuk K.: Koncepcja modelowania transportu bliskiego z wykorzystaniem sieci faz procesu, Logistyka 6/2014, s. 6686-6694.
176. Lewczuk K.: Organizacja procesu magazynowego a efektywność wykorzystania zasobów pracy, Logistyka 4/2011, s. 563–570.
177. Lewczuk K.: Reliability issues in designing functional areas of warehouse facilities [w:] Journal of KONBiN 2(38), 2016, s. 201–228.
178. Lewczuk K.: Selected aspects of organizing order-picking process with dynamic assignment of material to locations., Carpathian Logistics Congress, CLC 2012; Priesnitz SpaJesenik; Czech Republic; 7 – 9 November 2012, s. 565-571.
179. Lewczuk K.: The concept of genetic programming in organizing internal transport processes. Archives of transport, vol. 34, Iss. 2, s. 61-74, Warszawa 2015.
180. Lewczuk K.: Wybrane aspekty projektowania terminali cross-dockingowych, „Prace Naukowe PW. Transport", Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, z. 97, Warszawa, 2013, s. 327–336.
181. Lewczuk K., Żak J., Kłodawski M.: Model of dynamic allocation of resources to the tasks of warehousing process, Materiały konferencyjne, III Carpathian Logistics Congress, 9–11 grudnia, Kraków, Polska, 2013, s. 542–548.
182. Lewczuk K., Żak J.: Supportive Role of Dynamic Order Picking Area in Distribution Warehouse, Journal of Traffic and Logistics Engineering. vol. 1, No. 1, March 2013.
183. Lewczuk K.: Metoda projektowania obiektów logistycznych w aspekcie harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
184. Lewczuk K.: Modelowanie procesów w systemach magazynowych w zastosowaniu do oceny niezawodności i efektywności ich funkcjonowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016, ISBN 978-83-7814-638-4, 130 s.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

185. Lewczuk K.: The concept of genetic programming in organizing internal transport processes, The Archives of Transport, vol. 34, issue 2, 2015
186. Lin S.C., Wang H.P.: Modeling an automated storage and retrieval system using Petri nets. International Journal of Production Research 33, 1995.
187. Maciejewski M., Maciejewski M.: Mikrosymualacja ruchu drogowego dla obszaru miejskiego z zastosowaniem systemu vissim, Czasopismo Logistyka, nr 3, 2010.
188. Macro J.G., Salmi R.E.: A simulation tool to determine warehouse efficiencies and storage allocations. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, Yucesan E., Chen C.-H., Snowdon J.L., Charnes J.M. (eds.), 2002, 1274–1281.
189. Manikowski A., Tarapata Z.: Prognozowanie i symulacja rozwoju przedsiębiorstw, Warszawa 2002.
190. Manzini R., Bozer Y., Heragu S.: Decision models for the design, optimization and management of warehousing and material handling systems, International Journal of Production Economics, Volume 170, Part C, 2015, 711-716.
191. Markowski A.S. (red.): Zapobieganie stratom w przemyśle. Cz. III. Zarządzanie bezpieczeństwem procesowym. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
192. Markowski A.S. (red.): Zapobieganie stratom w przemyśle. Cz. II. Zarządzanie bezpieczeństwem i higieną pracy. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999.
193. Matson, J.O., White, J.A.: Storage system optimization, Working paper 81–09, 1981, Production and Distribution Research Centre, Georgia Institute of Technology.
194. Mazur M.: Pojęcie systemu i rygor ich stosowania, Postępy Cybernetyki, z. 2, 1987.
195. Michlowicz E.: Improving the efficiency and reliability of material flow in buffered systems. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, no. 42 (114), 2015, s. 26-32.
196. Michlowicz E., Kisiel P., Wolczko P.: Modelowanie logistycznego systemu walcowni za pomocą symulatora DOSIMIS-3. Problemy Maszyn Roboczych / Kolegium Twórczości Technicznej Akademii Inżynierskiej w Polsce, 2003 z. 21.
197. Michlowicz E.: Zarys logistyki przedsiębiorstwa, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie 2012.
198. Michlowicz E.: Logistics in production processes, „Journal of Machine Engineering", 13(4), 2013, s. 5–17.
199. Mielczarek B.: Modelowanie symulacyjne w zarządzaniu. Symulacja dyskretna, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
200. Młyńczak M. (red.): Analiza ryzyka w transporcie i przemyśle. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
201. Muller M.: Essentials of Inventory Management, AMACOM, USA 2003.
202. Myrcha K.: Zapobieganie zagrożeniom wypadkowym w transporcie wewnętrznym, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.
203. Myrcha K.: Znaki i sygnały bezpieczeństwa Warszawa, CIOP, 2002.
204. Naylor T.H.: Modelowanie cyfrowe systemów ekonomicznych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1995.
205. Naylor T.H: Modelowanie cyfrowe systemów ekonomicznych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1975.
206. Neo H.-Y., Xie M., Tsui K.-L.: Service quality analysis: case study of a 3PL company, International Journal of Logistics Systems and Management, Vol. 1, Iss. 1, 2004, s. 64-80.
207. Niemczyk A.: Zapasy i magazynowanie. Tom II, Biblioteka Logistyczna, Poznań 2006.
208. Noche B.m Simulation von Standardmodellen in der Logistik – Fortschritte in der Simulation-Stechnik. [w:] ASIM 11. Symposium in Dortmund, Hrsg: A. Kuhn, S. Wenzel, Dortmund 1997.
209. Norma: PN EN 613101:2008 Bezpieczeństwo maszyn – Wskazywanie, oznaczanie sterowanie. Wymagania dotyczące sygnałów wizualnych, akustycznych i dotykowych.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

210. Norma: PN EN 613102: 2008 Bezpieczeństwo maszyn – Wskazywanie, oznaczanie i sterowanie. Wymagania dotyczące oznaczania.
211. Norma: PN EN 842:2002 Maszyny. Bezpieczeństwo – Wizualne sygnały niebezpieczeństwa – Ogólne wymagania, projektowanie i badanie.
212. Norma: PN EN 8942: 2002 Maszyny. Bezpieczeństwo – Wymagania ergonomiczne dotyczące projektowania wskaźników i elementów sterowniczych. Część 2: Wskaźniki.
213. Norma: PN EN 981:2002 Maszyny. Bezpieczeństwo – System dźwiękowych i wizualnych sygnałów niebezpieczeństwa oraz sygnałów informacyjnych.
214. Norma: PN ISO 38641: 2006 Symbole graficzne – Barwy bezpieczeństwa i znaki bezpieczeństwa. Cz. 1: Zasady projektowania znaków bezpieczeństwa stosowanych w miejscach pracy i w obszarach użyteczności publicznej.
215. Norma: PN-80/Z-08052.
216. Norma: PN-M-78010:1968P Transport wewnętrzny. Drogi i otwory drzwiowe. Wytyczne projektowania.
217. Norma: PN ISO 7010:2006 Symbole graficzne Barwy bezpieczeństwa i znaki bezpieczeństwa Znaki bezpieczeństwa stosowane w miejscach pracy i w obszarach użyteczności publicznej.
218. Nowakowski T.: Niezawodność systemów logistycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
219. Nowakowski T.: Problemy niezawodności funkcjonowania systemów logistycznych, Inżyniera Maszyn 9(1), 2004.
220. Nowicki T.: Modelowanie matematyczne. Metody symulacyjne, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1994.
221. Occupational Safety & Health Administration. Powered Industrial Trucks: OSHA, 2003.
222. Ocena ryzyka zawodowego, Doradztwo Przemysłowo-Gospodarcze Staworzyński – poprawa efektywności kluczowych zasobów firmy. Materiały dostępne na stronie: http://www.staworzynski.com/
223. Osman I.H., Laporte G.: Metaheuristics: A bibliography, Annals of Operation Research, vol. 63, 1996.
224. Palagin Y., Mochalov A., Timonin A.: Mathematical modelling and parameters calculations in multimodal freight terminal networks, The Archives of Transport, vol. 30, issue 2, 2014.
225. Park Y. H. & Webster D. B. Design of class-based storage racks for minimizing travel time in a three-dimensional storage system, International Journal of Production Research, Vol. 27 No. 9, 1989, s. 1589-1601.
226. Pawłowski J. Metodyka oceny efektywności finansowej przedsięwzięć gospodarczych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2004.
227. Petersen C.G., Siu C., Heiser D.R.: Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage, International Journal of Operations & Production Management, vol. 25, Iss. 10, 2005, s. 997–1012.
228. Petersen C.G.: The impact of routing and storage policies on warehouse efficiency, International Journal of Operations & Production Management 19(10), 1999, s. 1053-1064.
229. Petersen C.G.: An evaluation of order picking routing policies, International Journal of Operations & Production Management, 17 (11), 1997.
230. Petersen C.G.: Routing and storage policy interaction in order picking operations, Decision Sciences Institute Proceedings, str. 1614-1616, 1995.
231. Pfohl H. Ch.: Systemy logistyczne, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 1998.
232. Piasecki S.: Sieciowe modele symulacyjne do wyznaczania strategii rozwoju przedsiębiorstw (teoria i praktyka), Instytut Interfakcji, Warszawa 2000.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

233. Piasecki S.: Optymalizacja systemów przewozowych, WKiŁ, Warszawa 1973.
234. Pietrzak L.: Ocena ryzyka zawodowego. Poradnik 139. Wydawnictwo Biblioteczka Pracownicza, Warszawa 2002.
235. PN-EN 1050:1999 Bezpieczeństwo – Maszyny – Zasady oceny ryzyka; została zastąpiona przez PN-EN ISO 12100:2011 Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka (oryg.).
236. PN-IEC 60300-3-9:1999 Zarządzanie niezawodnością – Przewodnik zastosowań – Analiza ryzyka w systemach technicznych.
237. PN-N-18002:2000 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy – Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.
238. Popiela K., Wasiak M.: Optimization of Unit Load formation taking into account the mas of packing units, Archives of Transport, vol. 32, Iss. 4, 2014, s. 73-80.
239. Powierża L.: Elementy inżynierii systemów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
240. Pritchard R.D.: Measuring and Improving Organizational Productivity: A Practical Guide. Greenwood Publishing Group, 1999.
241. Pyszka A.: Istota efektywności. Definicje i wymiary. Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Nr 230, Katowice 2015.
242. Radzikowski W.: Badania operacyjne w zarządzaniu przedsiębiorstwem. Toruńska Szkoła Zarządzania, Toruń 1997.
243. Raport z zadania 1 pt. „Lokalizacja obiektu magazynowego w sieci transportowo-dystrybucyjnej" realizowanego w ramach projektu „System do modelowania i wizualizacji w 3D obiektów magazynowych (SIMMAG3D)", finansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.
244. Raport z zadania 2 pt. „Model obiektu magazynowego" realizowanego w ramach projektu „System do modelowania i wizualizacji w 3D obiektów magazynowych" (SIMMAG3D), finansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.
245. Raport z zadania 3 pt. „Modelowanie procesu magazynowego w ujęciu wariantowym" realizowanego w ramach projektu „System do modelowania i wizualizacji w 3D obiektów magazynowych" (SIMMAG3D), finansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.
246. Raport z zadania 4 pt. „Opracowanie katalogów urządzeń i środków transportowych oraz wyposażenia obiektów magazynowych" realizowanego w ramach projektu „System do modelowania i wizualizacji w 3D obiektów magazynowych" (SIMMAG3D), finansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.
247. Raport z zadania 5 pt. „Budowa bazy danych dla systemu modelowania i wizualizacji w 3D obiektów magazynowych" realizowanego w ramach projektu „System do modelowania i wizualizacji w 3D obiektów magazynowych" (SIMMAG3D), finansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.
248. Raport z zadania 6 pt. „Opracowanie specyfikacji funkcjonalnej dla systemu SIMMAG3D" realizowanego w ramach projektu „System do modelowania i wizualizacji w 3D obiektów magazynowych" (SIMMAG3D), finansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.
249. Ratkiewicz A.: A combined bi-level approach for the spatial design of rack storage area, Journal of the Operational Research Society, Vol. 64, No. 8, 2013, s. 1157-1168.
250. Ratkiewicz A., Bialik A.: Wybrane sposoby zwiększenia bezpieczeństwa użytkowania wózków widłowych, Czasopismo Logistyka 3/2007.
251. Ratliff H. D., Rosenthal A.S.: Order picking in a rectangular warehouse: solvable case of the Traveling Salesman Problem, Operations Research 31(3), 1983.
252. Rizzi A., Zamboni R.: Efficiency improvement in manual warehouses through ERP systems implementation and redesign of the logistics processes. Logistics Information Management, Vol. 12 Iss. 5, 1999, s. 367–377.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

253. Roberts S.D., Reed R.: Optimal warehouse bay configurations, AIIE Transactions, Vol. 4, No. 3, 1972, s. 178–185.
254. Robinson S.: Simulation: The practice of model development and use, John Wiley & Sons Ltd, 2004.
255. Rodzaje zagrożeń wg Obwieszczenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 28 sierpnia 2003 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Socjalnej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy.
256. Romanowska-Słomka I., Słomka A.: Karty oceny ryzyka zawodowego dla 100 stanowisk pracy. SIGMA-NOT, ATEST, Kraków 2008.
257. Romanowska-Słomka I., Słomka A.: Ocena ryzyka zawodowego. TARBONUS, Tarnobrzeg 2010.
258. Roodbergen K.J.: Layout and routing methods for warehouses, Ph.D. thesis, RSM Erasmus University, Rotterdam, 2001.
259. Roodbergen K.J., De Koster R.: Routing methods for warehouses with a multiple cross aisles, European Journal of Production Research, 2001.
260. Rosenblatt M.J., Roll Y.: Warehouse capacity in a stochastic environment. International Journal of Production Research 26, 1998.
261. Rosiński A.: Modelowanie procesu eksploatacji systemów telematyki transportu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2015.
262. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 10 maja 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy użytkowaniu wózków jezdniowych z napędem silnikowym. (Dz.U. 2002 nr 70 poz. 650).
263. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 lipca 2001 r. w sprawie trybu sprawdzania kwalifikacji wymaganych przy obsłudze i konserwacji urządzeń technicznych (Dz.U. Nr 79, poz. 849, z dnia 31 lipca 2001 r.), z późniejszymi zmianami.
264. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 20 września 2001 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas eksploatacji maszyn i innych urządzeń technicznych do robót ziemnych, budowlanych i drogowych. (DzU 2001 nr 118, poz. 1263.
265. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy. Tekst jedn. DzU 2003 nr 169, poz. 1650, zmiana DzU 2007 nr 49, poz. 330.
266. Rutherford D.: Routledge dictionary of economics. Londyn: Taylor& Francis Group, 2002.
267. Sadkowski W.: Podstawy ogólnej teorii systemów, PWN, Warszawa 1978.
268. Safety Code for Forklift Truck Operators, No.2 Order Pickers, Published by the Department of Labour, New Zealand 1986.
269. Saulewicz A., Filipek D., Najmiec A., Skoniecki S., Zamojski A.: Opracowanie wytycznych dotyczących organizacji ruchu podnośnikowych wózków jezdniowych w transporcie wewnątrzzakładowym. Modyfikacja symulatora podnośnikowego wózka jezdniowego. Sprawozdanie z realizacji etapu 2. CIOP-PIB 2012.
270. Saulewicz A.: Organizacja ruchu podnośnikowych wózków jezdniowych czołowych w transporcie wewnątrzzakładowym: poradnik, CIOP-PIB, Warsaw, 2013, ISBN 9788373731516.
271. Sienkiewicz P.: Inżynieria systemów. Wyd. MON,1983.
272. Siergiejczyk M., Rosiński A.: Safety analysis of telematic systems [w:] New Results in Dependability and Computer Systems. Proceedings of the 8th International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2013, vol. 224, s. 135-148.
273. Simchi-Levi D. Simchi-Levi E.: Logistics Systems Modeling. Handbook of Industrial Engineering", wyd. 3, John Wiley Sons, 2001, s. 2007–2019.
274. Słownik języka polskiego, Szymczak M. (red.), PWN, Warszawa 1978.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

275. Sprawozdanie z kontroli PIP w latach 2005-2010.
276. Stadtler H.: Optimal dimensions for automated storage/retrieval systems. Progress in Material Handling Research, The Material Handling Industry of America, Charlotte, NC, 1996.
277. Suzuki Y.: A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 16, Iss. 1, 2011.
278. Szopa T.: Niezawodności i bezpieczeństwo [w]: Podstawy konstrukcji maszyn, t. I, WNT, Warszawa 1999.
279. Szopa T.: Niezawodności i bezpieczeństwo. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2009.
280. Szopa T.: Niezawodności w systemie człowiek-technika-środowisko [w]: Bezpieczeństwo pracy i ergonomia, t. 2, Warszawa, CIOP 1997.
281. Szopa T.: Problematyka bezpieczeństwa pracy. Bezpieczeństwo i higiena pracy – Materiały studiów podyplomowych Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
282. Szopa T.: Statystyczna analiza ryzyka w lotach szybowcowych. Materiały konferencyjne Bezpieczeństwo i Niezawodność, KONBIN, Zakopane 1999.
283. Tarapata Z.: Modelling and analysis of transportation networks using complex networks: Poland case study, Archives of Transport, vol. 36, iss. 4, 2015.
284. Tewoldeberhan T.W., Verbraeck A., Valentin E., Bardonnet G.: Software evaluation and selection: an evaluation and selection methodology for discrete-event simulation software. Proceedings of 34th conference on Winter simulation, 2002.
285. TFTM: Traffic Flow Theory Monographs: Revised Traffic Flow Theory. a state of the Tport. Transportation Research Board, National Academy of Science, USA 2001.
286. Uzarczyk A.: Czynniki szkodliwe i uciążliwe w środowisku pracy. ODDK, Gdańsk 2009.
287. Van den Berg J. P., Sharp G. P., Gademann A. J. R. M., Pochet Y.: Forward reserve allocation in a warehouse with unit-load replenishments, European Journal of Operational Research 111, 1998, s. 98-113.
288. Van der Meer J. R., Operational Control of Internal Transport, ERIM Ph.D. series Research in Management 1, The Netherlands TRAIL Research School, Sept. 2000.
289. Vaughan T.S., Petersen C.G.: The effect of warehouse cross aisle on order picking efficiency, International Journal of Production Research, 37 (4), 1999.
290. VDI-Richtlinie: VDI 3633 Blatt 1 Simulation von Logistik, Materialfluss und Produktionssystemen – Grundlagen. Duseldorf 2010.
291. Villemeur A.: Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment. Wiley 1992.
292. Vis I.F.A., Roodbergen K.J.: Layout and control policies for cross docking operations, Computers and Industrial Engineering, Vol. 61, No. 4, 2011, s. 911-919.
293. Wasiak M.: A queuing theory approach to logistics systems modelling, Archives of Transport, Vol. 19, Iss. 1-2, 2007, s. 103–120.
294. Wasiak M., Jacyna-Gołda I.: Transport drogowy w łańcuchach dostaw, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
295. Wasiak M.: Odwzorowanie obiektu logistycznego jako systemu masowej obsługi. Logistyka 6/2006.
296. Wasiak M.: Symulacja procesów logistycznych z wykorzystaniem programu SymProLog 1 [w:] Systemy Logistyczne. Teoria i Praktyka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, s. 525-532.
297. Wasiak M.: Modelowanie przepływu ładunków w zastosowaniu do wyznaczania potencjału systemów logistycznych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z.79, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
298. Webster J., Dalby M., Fox D., Pinder A.,Factors in the design of order picking systems that influence manual handling practices, Health and Safety Laboratory, Harpur Hill, Buxton, 2014
299. Weinberg G.M.:Myślenie systemowe, WNT, Warszawa 1979 (tłum. z ang. 1975).

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

300. Whitley L. D., Howe A. E., Rana S., Watson J. P., Barbulescu L.: Comparing Heuristic Search Methods and Genetic Algorithms for Warehouse Scheduling. Computer Science Department Colorado State University, Air Force Office of Scientific Research, Air Force Material Command, USAF. Grant No. F49620-97-1-0271. Kolorado 1997.
301. WorkCover New South Wales (2006). Manual Order Picking: WorkCover's Expectations for Safe Work Practice. Guide 2006. (Gosford, NSW 2250: WorkCover New South Wales), Catalogue No. 1382.
302. Wuendry J.: How Automation Technologies Improve Operating Efficiency and Reduce Collisions on Manned Forklifts, SICK, Inc, www.sickusa.com.
303. Wypadki przy pracy w 2014 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2015.
304. Yancang Li, Wanqing Li: Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm Based on Information Entropy: Foundation and Application, Fundamenta Informaticae, IOS Press, 2007.
305. Yang M. H.: An efficient algorithm to allocate shelf space, European Journal of Operational Research 131, 2001, s. 107-118.
306. Yu M., De Koster MBM: The impact of order batching and picking area zoning on order picking system performance. European Journal of Operational Research 198(2), 2009.
307. Zawieska W. (red.): Ryzyko zawodowe. Metodyczne podstawy oceny. CIOP-PIB, Warszawa 2008.
308. Zawiślak A.: System i metoda, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 1986.
309. Ziemba S., Jarominek W., Staniszewski R.: Problemy teorii systemów. Ossolineum, Warszawa 1980.
310. Żak J., Jacyna-Gołda I., Wasiak M., Effectiveness evaluation criteria of the functioning of the national transport system and its impact on the environment, [w:] Simulation model to support designing a sustainable national transport system / Jacyna M., Wasiak M. (red.), 2014, Index Copernicus International.
311. Żak J.: Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe – Transport z. 99, Warszawa 2013.

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

SPIS ILUSTRACJI

Rys. 1.1. System magazynowy i jego otoczenie 11
Rys. 2.1. Schemat procesu modelowania 21
Rys. 2.2. Procedura konstruowania modelu matematycznego 24
Rys. 3.1. Warianty układu technologicznego magazynu 37
Rys. 4.1. Kryteria doboru technologii magazynowania (Bl. w reg. oznacza składowanie blokowe w regałach; Rz. w reg. oznacza składowanie rzędowe w regałach) 58
Rys. 4.2. Klasyfikacja wózków widłowych 60
Rys. 4.3. Przykłady heurystycznych metod wyznaczania tras w jednoblokowych strefach regałowych 65
Rys. 4.4. Poziom ryzyka urazu pracowników podczas pobierania z różnych stref pobrań 70
Rys. 4.5. Poziomy ryzyka urazu pracowników w przypadku pobierania artykułów o określonej wadze (w kilogramach) z określonych lokacji – przy założeniu 60 powtórzeń w ciągu 2 h 71
Rys. 4.6. Efekt wahadła (*pendulum effect*) pojawiający się po upadku pracownika ze zbyt luźnymi pasami bezpieczeństwa 72
Rys. 4.7. Przykładowa sytuacja na skrzyżowaniu dróg transportu wewnętrznego (a) i pole widzenia operatora opuszczającego korytarz roboczy (b) 75
Rys. 4.8. Przykładowe sytuacje kolizyjne na skrzyżowaniu dróg transportu wewnętrznego ... 76
Rys. 4.9. Hierarchia skuteczności zarządzania bezpieczeństwem 81
Rys. 4.10. Proces powstawania strat w systemie C-T-O 90
Rys. 4.11. Algorytm analizy ryzyka zawodowego 97
Rys. 5.1. Graficzna prezentacja elementów modelu ***MPM*** 106
Rys. 5.2. Schemat podziału przestrzeni magazynowej w modelu ***MPM*** 108
Rys. 5.3. Przykład prezentacji lokacji magazynowej 109
Rys. 5.4. Jednostki podziału funkcjonalnego przestrzeni magazynowej – przykład 109
Rys. 5.5. Strumienie materiałów i informacji obsługiwanych przez obiekt magazynowy 116
Rys. 5.6. Interpretacja drogi przejścia jednostki między lokacjami 136
Rys. 5.7. Interpretacja drogi przejścia jednostki między lokacjami w różnych *sf*-tych strefach magazynowych, uwzględniając układ dróg transportu wewnętrznego 137

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rys. 6.1. Strefa kompletacji wraz z zaznaczonymi miejscami pobrań oraz jej odwzorowanie za pomocą grafu ... 156
Rys. 7.1. Etapy modelowania symulacyjnego ... 168
Rys. 7.2. Wybrane kryteria wyboru oprogramowania symulacyjnego ... 172
Rys. 8.1. Podstawowe elementy modelu symulacyjnego: wózek widłowy z operatorem (a), źródło (b) i ujście (c) materiałów wychodzących z układu oraz AStarNavigator (c), bufory materiałów na wejściu i wyjściu z układu (d, e), dyspozytor zadań niezbędnych do realizacji w układzie (f) ... 176
Rys. 8.2. (a) Bariery do organizacji ruchu w układzie transportu wewnętrznego oraz (b) maska parametryzacji wózka widłowego – wartości parametrów wózków widłowych ... 177
Rys. 8.3. Maski parametryzacji regału ... 178
Rys. 8.4. Maski parametryzacji źródła (a) oraz dyspozytora (b) ... 178
Rys. 8.5. Schemat logiki działania oraz przepływu materiałów, informacji i zadań w modelowanych układach transportu wewnętrznego ... 180
Rys. 8.6. Ułożenie sfer wózka widłowego wykorzystywanych do wykrywania kolizji w modelu symulacyjnym ... 181
Rys. 8.7. Analizowane układy strefy składowania ... 183
Rys. 8.8. Organizacja ruchu w strefie składowania – dwukierunkowy ruch we wszystkich korytarzach roboczych (a) oraz jednokierunkowe korytarze robocze (b), jednokierunkowy ruch w korytarzach roboczych oraz jednokierunkowy ruch w korytarzach poprzecznych (c) ... 184
Rys. 8.9. Zestawienie liczby sytuacji potencjalnie niebezpiecznych przy wykorzystaniu 4, 6 oraz 8 wózków ... 189
Rys. 8.10. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach ... 190
Rys. 8.11. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach: 3B_2W_4U_BK, 3B_2W_6U_BK oraz 3B_2W_8U_BK ... 192
Rys. 8.12. Graficzna prezentacja miejsc zajścia identyfikacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach: 3B_1W_4U_BK, 3B_1W_6U_BK oraz 3B_1W_8U_BK ... 193
Rys. 8.13. Organizacja ruchu w strefie składowania – jednokierunkowy ruch w korytarzach roboczych oraz jednokierunkowy ruch w korytarzach poprzecznych z zaznaczoną przykładową trasą wózka (P) ... 194
Rys. 8.14. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach: 3B_P_4U_BK, 3B_P_6U_BK oraz 3B_P_8U_BK ... 195
Rys. 8.15. Graficzna prezentacja miejsc identyfikacji sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w ciągu 8 godzin pracy obiektu w poszczególnych wariantach ... 196
Rys. 8.16. Wyniki badań symulacyjnych dotyczących prędkości wózków dla 12 scenariuszy ... 198
Rys. 8.17. Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w różnych wariantach organizacji ruchu dla układu trójblokowego wg poszczególnych replikacji ... 200
Rys. 8.18. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla poszczególnych wariantów strefy trójblokowej ... 200

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rys. 8.19. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie trójblokowej z 4 wózkami 201
Rys. 8.20. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie trójblokowej z 6 wózkami 201
Rys. 8.21. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie trójblokowej z 8 wózkami 202
Rys. 8.22. Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych w różnych wariantach układu dwublokowego wg poszczególnych replikacji 202
Rys. 8.23. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla poszczególnych wariantów strefy dwublokowej 203
Rys. 8.24. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie dwublokowej z 4 wózkami 203
Rys. 8.25. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie dwublokowej z 6 wózkami 204
Rys. 8.26. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla różnych organizacji ruchu w strefie dwublokowej z 8 wózkami 204
Rys. 8.27. Wartości średnie liczby sytuacji niebezpiecznych, długości pokonywanej drogi i wydajności dla wszystkich wariantów 205
Rys. 8.28. Liczba sytuacji potencjalnie niebezpiecznych dla wszystkich wariantów układu transportu wewnętrznego 205

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

SPIS TABEL

Tabela 2.1. Ogólna klasyfikacja modeli w zastosowaniu do modelowania magazynów 30
Tabela 2.2. Przykłady modeli procesów i obiektów magazynowych w literaturze w podziale ze względu na cel badań i sposób ich wykorzystania 32
Tabela 3.1. Wybrane składowe procesu magazynowego w odniesieniu do transformowanego elementu (jm – jednostka magazynowa) 39
Tabela 4.1. Parametry, wady i zalety wybranych technologii składowania 55
Tabela 4.2. Długość drogi zatrzymania wózka bez ładunku przy różnych prędkościach jego ruchu 77
Tabela 4.3. Długość drogi zatrzymania wózka z ładunkiem 78
Tabela 4.4. Szerokości dróg transportowych zgodnie z PN-68, M-78010 83
Tabela 4.5. Ocena najczęściej wykorzystywanych metod oceny ryzyka 101
Tabela 7.1. Porównanie głównych klas narzędzi symulacyjnych ze względu na wybrane cechy 171
Tabela 8.1. Tabela analizowanych wariantów organizacyjnych układu transportu wewnętrznego 182
Tabela 8.2. Scenariusze badań wpływu prędkości na bezpieczeństwo 186
Tabela 8.3. Wyniki dla wariantów: 3B_2W_4U_ZK, 3B_2W_6U_ZK oraz 3B_2W_8U_ZK 187
Tabela 8.4. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_2W_4U_ZK, 3B_2W_6U_ZK oraz 3B_2W_8U_ZK 189
Tabela 8.5. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_2W_4U_BK, 3B_2W_6U_BK oraz 3B_2W_8U_BK 191
Tabela 8.6. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_1W_4U_BK, 3B_1W_4U_BK oraz 3B_1W_4U_BK 192
Tabela 8.7. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 replikacji dla wariantów: 3B_P_4U_BK, 3B_P_6U_BK oraz 3B_P_8U_BK .. 194
Tabela 8.8. Wartości średnie wybranych parametrów wyznaczone na podstawie wyników z 55 reprodukcji dla wszystkich wariantów z dwublokowym układem strefy 196
Tabela 8.9. Wyniki badań symulacyjnych dotyczących prędkości wózków magazynowych 197

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZAŁĄCZNIK 1

Wyniki symulacji dla poszczególnych replikacji wariantów układu trójblokowego z korytarzami dwukierunkowymi

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	2W _4U_BK			2W _6U_BK			2W _8W_BK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
1	61	154,46	165,25	146	223,93	242,75	195	219,03	242
2	69	151,81	168	135	222,94	241,75	181	220,14	242,38
3	53	152,99	166,88	169	222,85	242	214	216,65	241,75
4	41	152,42	167,5	150	221,79	239,38	213	219,92	241
5	67	153,05	166,5	149	222,33	243,13	227	222,68	244
6	61	154,55	165,25	138	220,06	240	166	221,18	242
7	61	152,32	167,5	150	222,56	243,25	229	220,77	244
8	75	153,78	165,75	172	225,5	240,88	263	224,67	244,5
9	57	153,2	166,5	178	225,45	241,5	199	222,5	243,25
10	42	153,07	166,63	144	219,27	239	168	219,61	241,75
11	42	152,79	167,25	138	217,91	239,25	187	215,28	239,75
12	56	151,23	168,63	172	222,48	242,13	222	221,27	244,25
13	67	153,75	166,13	169	218,54	240	208	220,64	241,25
14	53	152,27	167,5	150	222,33	241,25	221	223,69	243,38
15	71	152,75	167,25	148	222,29	241,13	183	217,63	241
16	61	152,14	167,88	150	221,91	243,38	234	218,21	242,13
17	58	152,02	167,75	150	221,22	241,63	199	218,36	243,63
18	57	154,79	165,13	174	228,08	241,5	231	222,75	241,63
19	33	152,04	167,88	149	219,72	238,88	204	219,7	240,13
20	46	152,28	167,5	148	222,93	241,63	197	218,09	242,5
21	54	150,58	169,13	145	222,18	242	206	218,68	240,25
22	61	151,71	167,88	146	220,36	239,5	205	221,55	241
23	46	154,28	165,38	146	218,51	241,75	201	217	239,5
24	63	153,68	166	174	224,78	240,75	235	219,82	240,63
25	57	153,2	166,75	153	222,17	241,5	214	217,67	240,25
26	54	151,35	168,63	166	221,12	241,38	198	215,05	240,25
27	58	150,29	169,63	158	221,38	241	176	216,85	241,5
28	49	152,44	167,25	164	219,86	239,75	200	221,12	241,63

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	2W _4U_BK			2W _6U_BK			2W _8W_BK		
	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h
29	62	153,95	165,88	133	222,97	241,25	218	218,93	240,63
30	49	151,9	167,88	144	220,39	239,25	190	216,45	239,13
31	50	151,7	168	182	223,71	241,63	199	218,76	241
32	54	153,17	166,63	154	218,31	240	216	218,54	240,88
33	57	152,82	167	143	223,45	243	217	224,06	244,75
34	70	153,43	166,13	148	221,27	240,5	194	214,97	240,38
35	63	151,43	168,38	163	219,87	242,13	211	219,83	245,88
36	70	152,22	167,38	170	216,55	239,38	188	213,97	238
37	64	152,12	167,75	142	222,36	241,88	172	220,29	241,63
38	49	152,66	167,13	147	219,79	240,38	195	215,05	239,63
39	52	151,84	168	152	219,43	240,63	192	217,65	242,5
40	46	154,43	165,38	149	225,42	243,13	201	223,89	242,38
41	60	153,6	166,13	156	224,18	241,5	209	223,5	242,5
42	69	151,8	167,88	139	223,74	241,5	205	219,4	240,63
43	63	154,22	165,75	134	223,41	241,88	200	218,26	242,38
44	60	151,52	168,25	156	217,56	241,25	208	221,95	241,63
45	55	153,3	166,5	181	227,07	242,75	217	223,92	243,13
46	46	151,74	168	153	219,83	239,13	189	215,4	238,13
47	60	153,34	166,5	179	221,74	240,88	202	219,51	240,25
48	55	151,47	168,25	154	219,45	239,63	257	219,47	240,38
49	57	153,89	165,88	154	220,75	242,5	191	221,4	241,75
50	57	153,35	166,38	161	225,42	240,75	193	221,94	240
51	69	152,64	167,25	166	223,44	241,5	196	216,33	238,38
52	45	153,04	166,75	131	225,48	243,25	188	224,26	242,5
53	51	152,4	167,38	158	220,77	241,25	186	221,2	242,88
54	56	152,83	166,88	156	222,7	242,25	225	219,63	241,5
55	53	152,86	167,13	159	225,88	242,25	199	216,08	241,25

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZAŁĄCZNIK 2

Wyniki symulacji dla poszczególnych replikacji wariantów układu trójblokowego z korytarzami jednokierunkowymi

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	1W_4U_BK			1W_6U_BK			1W_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
1	76	165,52	154,63	224	248,33	231	232	255,39	241,13
2	66	164,22	155,5	217	246,73	232,88	260	255,18	239,25
3	68	163,77	156,13	217	245	234,63	265	252,62	241,75
4	77	164,73	155	187	246,92	232,88	293	257,07	241,38
5	63	164,74	155	198	245,64	234,13	258	251,07	242,88
6	70	165,92	154	185	249,4	230,25	268	258,45	240,38
7	64	164,7	155,13	190	247,73	232	236	259,74	245,63
8	71	164,03	155,88	187	248,73	231	273	256,63	243,63
9	79	165,17	154,5	180	248,28	231,63	240	257,2	242
10	68	165,44	154,25	193	247,61	232,13	275	253,09	243,38
11	74	163,82	156	187	244,95	234,75	256	249,87	240,13
12	75	162,57	157,13	187	247,09	232,5	246	252,27	242,75
13	42	165,33	154,38	189	248,14	231,5	281	252,69	241,25
14	64	165,92	153,75	191	247,32	232,13	243	256,49	242,88
15	49	163,19	156,63	212	248,04	231,75	222	249,7	241
16	79	164,57	155,38	206	246,31	233,38	230	251,43	239,88
17	65	163,61	156,38	171	247,44	232,38	249	255,18	241,88
18	82	165,88	154	214	249	230,63	257	254,71	240,25
19	75	164,69	155,25	189	247,83	231,75	228	251,27	240
20	69	164,05	155,88	192	248,66	231,13	222	256,58	243,63
21	82	164,59	155,25	179	247,15	232,75	268	255,98	242,5
22	77	164,38	155,63	191	248,4	231,25	260	249,67	239,38
23	56	164,39	155,38	174	247,12	232,38	218	249,44	238,38
24	73	165,58	154,25	202	249,3	230,38	291	255,37	240,13
25	56	166,47	153,25	182	246,92	232,75	266	253,35	241,25
26	65	164,36	155,38	180	247,33	232,38	257	253,53	241,25
27	55	163,4	156,63	178	246,31	233,38	241	251,27	241
28	81	165,2	154,5	197	248,04	231,75	270	252,57	239,88

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	1W_4U_BK			1W_6U_BK			1W_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h
29	62	165,19	154,5	181	247,34	232,38	249	253,43	241
30	68	162,03	157,75	213	246,48	233	227	251,72	239,5
31	63	164,06	155,88	171	246,41	233,38	241	252,16	240,88
32	59	165,12	154,63	201	248,18	231,5	259	250,4	239,88
33	62	164,24	155,38	221	247,39	232,25	257	255,97	243
34	50	165,06	154,75	184	247,61	232	293	252,18	239,25
35	66	162,65	157,13	171	246,4	233,25	274	250,81	240,13
36	59	163,63	156,25	182	246,94	232,75	247	250,99	241
37	68	164,52	155,25	209	245,74	233,75	265	256,21	242,75
38	49	165,22	154,5	183	248,13	231,5	241	253,06	240
39	78	165,19	154,75	178	247,24	232,5	255	251,06	241,63
40	76	165,09	154,75	195	248,16	231,5	270	253,79	242,38
41	56	165,07	154,75	174	247,34	232,13	271	254,4	241,63
42	72	164,16	155,63	185	247,17	232,38	197	247,34	238,38
43	72	164,77	155,13	192	247,57	232	262	257,04	243,13
44	77	163,59	156,25	202	246,03	233,75	293	250,75	240,13
45	59	166,79	153	185	248,83	230,88	271	257,65	241,5
46	60	163,9	155,88	188	247,79	231,75	271	249,89	239,25
47	70	163,68	156,25	182	248,21	231,5	250	248,24	240
48	67	165,06	154,75	207	247,46	232,25	228	250,94	241,25
49	56	165,31	154,25	199	246,99	232,63	245	256,5	242,13
50	90	165,4	154,5	182	248,08	231,63	269	253,32	239,25
51	70	164,37	155,38	180	247,65	231,88	275	253,08	241,25
52	80	167,15	152,63	201	247,17	232,5	285	259,84	242,75
53	74	164,37	155,25	198	246,01	233,63	235	253,58	243,13
54	59	164,22	155,63	177	246,94	232,5	260	251,59	241,25
55	74	164,45	155,38	184	247,79	232	254	251	239,63

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZAŁĄCZNIK 3

Wyniki symulacji dla poszczególnych replikacji wariantów układu trójblokowego z wszystkimi korytarzami jednokierunkowymi

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	P_4U_BK			P_6U_BK			P_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
1	76	168,14	151,75	204	252,02	227,75	299	267,2	241,13
2	77	168,11	151,75	214	253,4	226,25	282	263,79	240,5
3	68	168,85	151	217	252,04	227,5	269	261,13	240,75
4	76	168,91	151	204	255,23	224,25	304	267,71	241,38
5	66	168,45	151,5	204	251,16	228,63	252	265,76	242,88
6	64	168,85	151	208	254,87	224,75	294	270,27	240,63
7	65	169,11	150,63	202	251,89	227,88	306	267,95	243,5
8	88	168,12	151,75	219	253,7	226	284	268,89	242,5
9	94	170,99	149	189	254,9	224,75	263	265,84	242,38
10	52	169,62	150,25	206	253,59	226	293	266,41	242,38
11	81	169,24	150,5	223	252,9	226,63	260	264,91	239,38
12	60	165,7	154,13	190	252,39	227,25	255	261,62	240,88
13	63	167,87	152,13	208	253,02	226,88	281	268,48	241,13
14	80	168,81	151	196	254,72	225	267	270,27	242,5
15	69	167,7	152,25	200	252,71	226,88	277	266,59	240,5
16	68	168,85	150,75	185	251,76	227,75	308	261,68	241,5
17	72	167,12	152,75	213	251,52	228,38	267	269,95	244,63
18	81	168,71	151,13	193	252,75	226,63	290	268,31	241,63
19	79	168,27	151,38	206	253,04	226,5	286	265,04	240,75
20	70	168,59	151,25	196	254,6	224,88	293	264,64	241,88
21	79	168,58	151	237	252,77	226,75	291	268,14	242
22	66	168,79	151,13	219	252,33	227,38	295	266,46	240,63
23	68	167,85	152	230	255,66	224,25	304	266,72	241,25
24	75	169,71	150	185	254,51	225,13	262	261,78	241
25	60	169,86	150	197	253,22	226,63	252	267,57	240,63
26	77	167,26	152,5	213	252,68	227	282	259,99	240,25
27	67	167,82	152	235	252,87	226,75	273	263,25	241,75
28	66	169,48	150,25	215	254,52	225,13	324	268,3	241,75

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	P_4U_BK			P_6U_BK			P_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h
29	84	168,04	152	183	254,13	225,5	271	263,76	241,63
30	84	168,45	151,25	231	252,79	226,88	280	262,09	239,63
31	80	168,03	151,75	189	252,21	227,5	279	263,42	240,25
32	80	168,96	151	219	253,51	226,13	311	264,11	241,75
33	68	170,11	149,5	238	255,76	224	310	273,41	242,63
34	74	169,76	150,13	185	251,13	228,5	283	264,64	240,13
35	65	167,59	152,25	209	251,21	228,25	306	258,94	241,63
36	78	168,21	151,63	209	251,58	228	265	263,69	241,75
37	88	168,95	150,88	233	254,01	225,5	274	268	242,5
38	76	169,48	150,38	205	252,48	227,25	255	262,58	238,13
39	74	168,81	151,25	201	252,05	227,63	272	264,39	241,5
40	62	171,62	148,38	220	255,04	224,5	309	275,5	244,13
41	64	169,33	150,38	234	252,74	226,63	312	269,67	242,88
42	75	168,47	151,25	214	251,91	227,5	282	259,53	238,25
43	78	167,84	152	209	252,93	226,63	270	262,98	240,38
44	93	168,83	151	197	251,61	227,88	284	265,85	239,38
45	70	169,68	150,25	208	253,77	225,88	265	268,5	242,38
46	81	167,83	152	197	251,22	228,5	294	263,01	240,38
47	80	169,92	149,75	207	253,5	226,25	295	263,91	242,38
48	69	167,48	152,25	236	252,62	227	283	264,08	240,75
49	62	169,34	150,75	210	253,41	226,13	322	267,18	240,75
50	75	168,77	151	202	253,8	225,88	280	268,26	239,63
51	63	167,54	152,5	221	254,89	224,75	268	262,19	238,88
52	67	170,01	149,88	209	253,23	226,38	314	269,38	244
53	75	169,09	150,75	181	252,71	227,13	257	264,45	243,13
54	68	169,29	150,5	204	252,58	226,88	255	267,59	243
55	75	169,27	150,88	206	251,05	228,63	273	261,84	239,88

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZAŁĄCZNIK 4

Wyniki symulacji dla poszczególnych replikacji wariantów układu trójblokowego z wszystkimi korytarzami dwukierunkowymi i uwzględnieniem kolizji w korytarzach roboczych

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	2W_4U_ZK			2W_6U_ZK			2W_8U_ZK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
1	264	668	1141	154,46	223,93	220,49	165,25	242,75	241,5
2	262	671	1119	151,81	222,94	220,1	168	241,75	242,38
3	253	720	1123	152,99	222,85	220,14	166,88	242	242,38
4	258	697	1105	152,42	221,79	219,92	167,5	239,38	241
5	268	674	1103	153,05	222,33	222,67	166,5	243,13	244
6	228	658	1054	154,55	220,06	221,18	165,25	240	242
7	245	698	1159	152,32	222,56	220,77	167,5	243,25	244
8	254	729	1105	153,78	225,5	219,61	165,75	240,88	242,5
9	266	727	1166	153,2	225,45	222,5	166,5	241,5	243,25
10	234	659	973	153,07	219,27	220,53	166,63	239	242,63
11	200	655	1112	152,79	217,91	215,28	167,25	239,25	239,75
12	250	740	1171	151,23	222,48	215,46	168,63	242,13	239,75
13	271	661	1028	153,75	218,54	220,64	166,13	240	241,25
14	247	700	1124	152,27	222,33	219,65	167,5	241,25	241,5
15	263	695	1050	152,75	222,29	218,35	167,25	241,13	241,38
16	246	693	1087	152,14	221,91	222,12	167,88	243,38	245,5
17	267	709	1149	152,02	221,22	218,36	167,75	241,63	243,63
18	257	706	1103	154,79	228,08	225,28	165,13	241,5	244
19	258	662	1164	152,04	219,72	220	167,88	238,88	241,13
20	234	655	1101	152,28	222,93	220,72	167,5	241,63	243,5
21	274	655	1170	150,58	222,18	223,47	169,13	242	244,63
22	236	649	1144	151,71	220,36	216,51	167,88	239,5	239,88
23	264	653	1081	154,28	218,51	215,8	165,38	241,75	240,63
24	267	716	1074	153,68	224,78	216,82	166	240,75	240,25
25	247	660	1163	153,2	222,17	218,55	166,75	241,5	239,63
26	238	730	1155	151,35	221,12	215,05	168,63	241,38	240,25
27	274	728	1164	150,29	221,38	218,86	169,63	241	241,38

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rep.	UKŁAD TRÓJBLOKOWY								
	2W_4U_ZK			2W_6U_ZK			2W_8U_ZK		
	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h
28	225	659	1082	152,44	219,86	218,57	167,25	239,75	241,25
29	252	674	1120	153,95	222,97	218,93	165,88	241,25	240,63
30	242	682	1120	151,9	220,39	215,5	167,88	239,25	239,63
31	246	728	1137	151,7	223,71	218,76	168	241,63	241
32	243	706	1126	153,17	218,31	218,77	166,63	240	240,75
33	230	674	1130	152,82	223,45	219,39	167	243	243,13
34	289	682	1143	153,43	221,27	214,93	166,13	240,5	240,38
35	265	724	1054	151,43	219,87	219,84	168,38	242,13	245,88
36	261	695	1164	152,22	216,55	217,58	167,38	239,38	241,5
37	258	707	1079	152,12	222,36	220,29	167,75	241,88	241,63
38	233	695	1068	152,66	219,79	219,04	167,13	240,38	240,25
39	238	669	1102	151,84	219,43	214,82	168	240,63	241,88
40	254	693	1119	154,43	225,42	224,25	165,38	243,13	244,63
41	250	682	1169	153,6	224,18	223,51	166,13	241,5	242,5
42	263	656	1042	151,8	223,74	219,41	167,88	241,5	240,63
43	250	663	1060	154,22	223,41	220,38	165,75	241,88	241,88
44	254	673	1133	151,52	217,56	221,95	168,25	241,25	241,63
45	263	732	1123	153,3	227,07	224,68	166,5	242,75	241,75
46	257	695	1103	151,74	219,83	217,41	168	239,13	238,63
47	277	727	1129	153,34	221,74	219,51	166,5	240,88	240,25
48	249	674	1100	151,47	219,45	218,64	168,25	239,63	240,13
49	246	706	1087	153,89	220,75	219,03	165,88	242,5	241
50	247	688	1065	153,35	225,42	221,94	166,38	240,75	240
51	247	719	1127	152,64	223,44	218,44	167,25	241,5	238,5
52	251	712	1201	153,04	225,48	227,84	166,75	243,25	245,13
53	275	673	1162	152,4	220,77	218,72	167,38	241,25	241,75
54	245	651	1088	152,83	222,7	217,11	166,88	242,25	241,38
55	229	691	1006	152,86	225,88	216,38	167,13	242,25	240

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZAŁĄCZNIK 5

Wyniki symulacji dla poszczególnych replikacji wariantów układu dwublokowego z wszystkimi korytarzami dwukierunkowymi

Rep.	UKŁAD DWUBLOKOWY								
	2W_4U_BK			2W_6U_BK			2W_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
1	52	146,39	173,38	123	202,17	241,63	159	200,46	239,63
2	49	146,44	173,25	121	204,95	242	170	200,28	241,38
3	42	145,42	174,13	123	203,9	242	154	200,56	242,13
4	41	146,17	173,5	111	202,03	241	141	200,82	241,88
5	62	145,32	174,38	130	203,97	242,88	153	201,07	242,5
6	48	146,57	173,13	106	204,62	241,75	154	199,83	240
7	52	145,96	173,75	134	203,87	243,75	197	201,29	243,5
8	46	146,56	173,13	137	204,85	241	177	205,33	243,13
9	44	146,53	173,25	110	205,82	244	146	204,91	243,63
10	57	146,78	172,88	126	205,08	240	186	203,37	241
11	36	146,86	173	130	204,95	241,88	132	201,73	242,38
12	45	145,57	174,25	140	203,47	240,13	134	199,57	241,5
13	47	146,45	173,25	130	204,86	242,75	175	202,99	242,38
14	61	146,15	173,63	124	205,18	242,25	191	201,13	241,13
15	56	146,29	173,5	115	201,38	241,38	138	198	240,75
16	62	145,69	174,13	127	202,56	242,75	143	200,59	241,25
17	37	146,01	173,5	121	203,06	242,13	171	204,2	243,75
18	50	146,25	173,38	117	203,93	242,13	144	203,07	243,25
19	56	146,82	172,88	123	203,39	241,75	146	199,34	239,63
20	46	145,63	174,13	148	208,44	245,88	157	201,45	242,25
21	58	145,56	174	141	203,47	240,5	185	202,08	241,75
22	57	145,83	174	113	204,72	242,75	167	201,32	240,5
23	65	145,76	174	134	201,23	240,88	134	200,3	239,38
24	44	146,89	172,88	131	205,15	241,25	167	201,23	239,63
25	46	147,37	172,25	131	203,2	239,5	167	200,1	240,88
26	29	145,24	174,5	124	201,36	239,13	152	200,04	241,25
27	50	146,07	173,75	119	204,28	243	150	201,27	241,25
28	36	146,35	173,5	140	201,05	240,63	175	201,71	240,63

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rep.	UKŁAD DWUBLOKOWY								
	2W_4U_BK			2W_6U_BK			2W_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
29	46	145,83	174	125	204,67	242,38	142	199,29	241
30	48	146,5	173,25	126	201,89	241	179	197,83	239
31	49	146,13	173,75	130	205,75	241	171	203,57	241,88
32	56	146,3	173,5	129	203,4	242,63	172	200,01	240
33	56	146,31	173,5	108	203,79	242,5	161	201,45	242,88
34	58	146,2	173,63	115	202,79	240,38	172	201,75	240,5
35	58	145,79	174	138	203,48	242,13	176	199,83	239,88
36	42	145,32	174,38	129	200,52	240,25	153	201,79	241,88
37	39	146,25	173,5	126	204,58	242	204	202,8	241,75
38	51	146,36	173,25	110	201,59	239,38	172	202,97	242,25
39	42	145,44	174,38	117	203,62	241,25	149	198,16	240,25
40	50	145,94	174	118	205,24	242,63	139	202,11	242,63
41	46	146,05	173,5	130	204,59	242,88	157	201,4	241,25
42	47	146,76	173,25	132	204,44	240	146	201,47	239,38
43	54	146,23	173,63	139	204,76	241,88	172	202,5	244,25
44	51	147,19	172,63	120	204,59	241,88	174	203,59	241
45	44	146,86	173	123	205,73	240,63	161	205,21	243,5
46	56	145,8	174	114	205,11	240,63	160	202,88	241,25
47	43	146,33	173,38	112	202,95	240,5	150	198,95	240,88
48	49	147,34	172,38	136	204,83	240,25	177	205,51	242,63
49	48	145,55	174,13	115	205,31	243,25	165	202,02	242,13
50	50	146,93	172,75	140	207,96	241,5	161	202,17	238,63
51	45	146,12	173,75	132	203,08	240,75	150	201,45	239,13
52	41	146,29	173,5	124	204,69	242,63	134	202,89	244,13
53	41	145,35	174,13	132	203,33	242,75	149	201,41	242,88
54	36	145,96	173,75	121	203,47	242,5	160	203,45	242,75
55	43	146,29	173,5	112	201,56	240,63	146	200,04	239,5

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZAŁĄCZNIK 6

Wyniki symulacji dla poszczególnych replikacji wariantów układu dwublokowego z wszystkimi korytarzami jednokierunkowymi

Rep.	UKŁAD DWUBLOKOWY								
	P_4U_BK			P_6U_BK			P_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
1	67	163,73	156,25	143	243,5	235,75	264	248,07	241,63
2	67	162,74	157	191	244,44	235,25	237	246,44	241,13
3	65	161,99	157,88	191	243,16	236,5	247	247,64	241,38
4	70	163,51	156,5	188	244,67	234,88	241	245,91	241
5	67	161,63	158	170	241,81	237,88	194	247,52	241,25
6	63	162,85	156,88	166	245,71	234	216	242,14	239,13
7	61	162,8	157	172	243,28	236,5	239	246,75	241,38
8	64	162,74	157,13	155	244,71	234,88	235	249,43	241,13
9	73	162,8	156,75	182	244,8	234,75	239	252,5	243,38
10	52	163,72	155,88	185	244,77	234,63	219	251,24	241,88
11	67	163,28	156,75	157	243,74	235,88	219	244,68	239,63
12	77	162,27	157,5	180	242,95	236,88	238	242,11	239
13	52	163	156,75	182	245,4	234,25	210	243,93	238,88
14	51	163,22	156,63	178	243	236,5	246	251,35	241
15	59	162,9	156,88	196	244,69	235	209	248,21	242,25
16	54	163,17	156,63	175	242,96	236,75	243	249,06	243,38
17	59	163,13	156,63	187	243,41	236,25	251	247,06	243,25
18	61	163,01	156,88	183	242,93	236,63	220	248,86	243,5
19	80	162,32	157,63	179	243,08	236,5	249	244,17	239,38
20	70	162,39	157,5	169	243,96	235,75	245	249,67	243,63
21	69	161,56	158,25	188	244,3	235,25	258	250,82	243
22	63	162,27	157,38	171	243,72	236	229	244,03	240,75
23	62	162,43	157,25	173	243,75	235,88	205	247,03	241,5
24	62	162,64	157,13	185	243,41	236	229	246,73	240,25
25	67	162,24	157,38	206	244,58	235	228	245,72	240,5
26	57	162,5	157,38	176	243,48	236,13	239	240,4	238,63
27	64	163,18	156,5	208	244,36	235,38	204	243,21	240,5
28	71	163,17	156,63	178	243,54	236,13	272	246,18	239,75

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rep.	UKŁAD DWUBLOKOWY								
	P_4U_BK			P_6U_BK			P_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h
29	50	163,6	156,13	187	243,6	236	202	243,71	241,13
30	65	162,71	157	207	243,86	235,63	260	245,66	238,63
31	51	163,21	156,5	205	244,03	235,5	246	250,1	243,5
32	53	162,46	157,25	177	244,63	235,13	222	245,47	242,38
33	68	161,54	158,25	177	243,91	235,63	284	246,74	241,13
34	62	163,53	156,25	178	245,05	234,63	214	245,02	240,88
35	70	161,98	157,63	181	242,65	236,88	212	247,55	244,88
36	67	161,76	157,88	172	243,69	236	248	243,08	239,13
37	52	163,79	156	181	244,64	234,88	254	246,62	242
38	59	162,33	157,5	160	242,43	236,88	240	241,4	238,75
39	68	163,1	156,75	167	243,83	236	247	246,02	240,5
40	62	163,11	156,63	182	244,94	235	287	252,5	243
41	69	161,71	158,13	153	242,36	237,38	268	249,6	244,25
42	67	164,38	155,25	194	245,28	234,38	253	244,99	238,5
43	64	163,14	156,63	143	245,28	234,38	233	248,37	242,5
44	66	163,64	156	196	244,79	234,88	208	248,23	242
45	68	163,74	156	177	245,49	234,25	233	247,89	241,88
46	73	162,84	157	183	244,95	234,75	256	245,25	239,38
47	57	163,65	156,13	189	244,51	235,25	251	248,22	242,5
48	63	162,53	157,25	194	242,38	237,25	245	246,97	240,88
49	76	162,01	157,88	182	244,23	235,25	232	249,57	242,13
50	75	164,39	155,5	161	244,51	235,25	231	245,99	237,63
51	57	162,38	157,63	199	244,72	234,88	225	244,41	239,75
52	60	162,9	156,88	164	243,64	236,13	243	249,66	242,38
53	82	162,65	157,13	200	242,83	236,88	259	245,43	241,38
54	79	163,08	156,63	166	243,97	235,5	211	243,47	240,5
55	63	161,85	157,88	189	244,45	235,25	212	245,65	241,25

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

ZAŁĄCZNIK 7

Wyniki symulacji dla poszczególnych replikacji wariantów układu dwublokowego z jednokierunkowymi korytarzami roboczymi

Rep.	UKŁAD DWUBLOKOWY								
	1W_4U_BK			1W_6U_BK			1W_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyjnych	Liczba km	Liczba jedn/h
1	53	158,44	161,25	163	240,06	239,63	229	237,44	243,25
2	53	159,28	160,63	169	234,81	238,38	190	234,11	241,5
3	65	157,02	162,88	135	235,51	239,25	204	234,26	241,38
4	56	158,64	161	159	237,63	240	179	234,67	239,88
5	55	158,07	161,75	171	236,65	241,5	214	236,19	242,13
6	65	158,85	160,88	148	238,26	240,5	240	234,4	240,13
7	52	158,71	161,13	171	238,99	240,63	248	237,96	244
8	47	158,75	161	153	238,03	241,5	248	239,08	242,25
9	69	159,59	160,13	153	238,29	241,38	185	238,37	244,25
10	60	158,99	160,88	172	236,09	239,38	192	238,63	242
11	56	159,24	160,5	168	237,78	240,63	197	235,64	241,13
12	55	158,46	161,25	164	233,42	239,25	194	232,31	241,25
13	59	159,11	160,75	139	236,79	237,5	209	234,82	239,38
14	70	158,05	161,88	176	237,73	238,38	223	234,34	240
15	42	158,92	161	157	237,13	241,25	222	233,72	240
16	52	158,28	161,63	159	236,45	241,5	188	233,72	242,75
17	67	159,12	160,63	172	238,3	241,25	203	236,45	242,63
18	61	159,56	160,25	138	239,9	239,63	199	235,61	242,38
19	49	159,36	160,5	136	235,95	238	214	234,13	240,88
20	56	158,9	160,88	177	238,98	240,5	200	234,29	241,25
21	64	157,59	162	170	238,69	241,13	202	233,91	241,25
22	57	158,42	161,25	154	236,47	240,25	210	235,68	242
23	54	158,25	161,38	161	236,69	239,38	211	235,12	242,25
24	67	158,93	160,75	187	234,42	237,88	210	236,19	241
25	63	158,61	161,38	174	236,71	241,25	178	230,67	240,38
26	56	158,72	161,13	153	237,64	240,75	204	233,28	241,5
27	59	158,56	161,13	166	236,42	241,13	211	231,28	240,13
28	63	159,18	160,5	154	234,3	238,5	185	237,08	243,88

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Rep.	UKŁAD DWUBLOKOWY								
	1W_4U_BK			1W_6U_BK			1W_8U_BK		
	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h	Liczba sytuacji kolizyj-nych	Liczba km	Liczba jedn/h
29	53	158,73	161,13	148	237,92	241	207	238,39	243,38
30	47	158,3	161,5	147	236,81	239,38	204	232,78	240,63
31	50	158,59	161,25	175	236,34	240,13	225	236,62	241,63
32	62	158,86	160,88	178	235,85	241,5	205	234,59	241,88
33	43	158,02	161,75	150	237,47	240,25	208	233,34	241,25
34	49	158,46	161,25	162	236,91	239,88	204	234,74	239,75
35	60	157,57	162,13	182	237,42	242,25	203	235,38	241,75
36	43	157,96	161,75	160	235,06	238,5	206	235,82	239,5
37	61	159,37	160,5	146	238,96	240,63	219	237,56	243,5
38	54	157,96	161,88	150	236,37	240,88	219	232,91	240,38
39	71	158,69	161,25	151	234,78	237,63	224	233,52	238,25
40	72	158,6	161,13	172	237,82	241,88	223	238,06	243,25
41	55	158,8	160,88	150	237,82	241	209	235,51	242,5
42	53	159,18	160,63	185	238,57	239,25	200	235,17	238,88
43	63	158,15	161,63	184	235,72	241	203	238,23	242,25
44	50	158,88	161,13	172	238,19	240,38	187	235,62	242,63
45	55	159,13	160,63	172	238,52	240,63	192	238,01	240,75
46	56	159,03	160,75	153	237,5	239,63	256	233,89	238,88
47	48	159,27	160,5	176	239,63	240	213	232,8	241,13
48	58	158,82	160,88	168	234,96	238,63	197	234,36	240
49	70	158,95	160,88	184	237,99	241	224	234,08	241
50	47	160,37	159,63	162	237,64	240,63	198	235,25	239,25
51	51	158,77	161,13	164	234,61	239,88	232	234,03	240
52	60	158,7	161	162	238,29	241,38	219	234,93	242,5
53	47	158,31	161,5	144	237,74	241,63	230	236,21	241,25
54	64	158,7	160,88	164	235,25	240,25	212	235,13	243
55	57	157,94	162	173	236,53	239	177	228,98	238,5

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 16029573A3463363

Oficyna Wydawnicza PW jest wydawnictwem największej polskiej uczelni technicznej – Politechniki Warszawskiej, prowadzącej działalność naukowo-dydaktyczną na 48 kierunkach studiów.

Publikacje wydawnictwa są dostępne w bibliotekach i księgarniach na terenie Politechniki Warszawskiej oraz innych uczelni, a także księgarniach technicznych na terenie całego kraju. Pełna oferta wydawnicza jest prezentowana na stronie internetowej:

www.wydawnictwopw.pl

Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej prowadzi sprzedaż:

- stacjonarną – w księgarniach OWPW
  - Gmach Główny Politechniki Warszawskiej przy Placu Politechniki 1
  - ul. Noakowskiego 18/20
- internetową
  - http://www.wydawnictwopw.pl
- wysyłkową
  - tel. 22 234-75-03; fax 22 234-70-60
  - e-mail: oficyna@pw.edu.pl

ISBN 978-83-7814-809-8